Conférence générale des poids et mesures

Comptes rendus de la 27e réunion de la CGPM

General Conference on Weights and Measures

Proceedings of the 27th meeting of the CGPM

2022

Bureau international des poids et mesures

Comptes rendus de la 27e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (novembre 2022)

English version

Proceedings of the 27th meeting of the General Conference on Weights and Measures (November 2022)

Bureau international des poids et mesures

Conférence générale des poids et mesures

27e réunion (15-18 novembre 2022)

Note sur l’utilisation du texte anglais

Les comptes rendus de la Conférence générale des poids et mesures sont présentés en anglais (page 229) en même temps qu’en français. Il n’en demeure pas moins que la version officielle, en particulier concernant les résolutions adoptées par la Conférence, est celle en langue française.

The proceedings of the General Conference on Weights and Measures are prepared in English as well as French. Please note, however, that the official version, particularly of the Resolutions voted by the Conference, is the French one.

Édité par le BIPM

Pavillon de Breteuil

F-92312 Sèvres Cedex

France

Conception graphique :

Monika Jost

ISSN 1016-5893

ISBN 978-92-822-2288-1

Table des matières

Liste des délégués et des invités 9

Comptes rendus des séances, 15-18 novembre 2022 **29**

Ordre du jour **30**

Première séance – 15 novembre 2022 (matin)

1. Présentation des titres accréditant les délégués **33**
2. Ouverture de la réunion par M. le président de l'Académie des sciences, président de la CGPM **33**
3. Discours d'ouverture donné par M. le directeur général du Laboratoire national de métrologie et d'essais au nom de la République française **33**
4. Réponse de M. le Président du Comité international des poids et mesures **35**
5. Discours de M. le président de l'Académie des sciences de Paris **36**
6. Nomination du secrétaire de la CGPM **39**
7. Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter **39**
8. Approbation de l'ordre du jour **42**
9. Approbation de la procédure spéciale **42**
10. Rapport du président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 26e réunion de la CGPM **42**
    - 10.1. États Membres et Associés **43**
    - 10.2. CIPM **44**
    - 10.3. Actions résultant des Résolutions adoptées par la CGPM à sa 26e réunion **47**
    - 10.4. Rapport sur les actions entreprises par le CIPM concernant la stratégie du CIPM à compter de 2030 **49**
    - 10.5. Comités consultatifs du CIPM **56**
    - 10.6. CIPM MRA **61**
    - 10.7. Renforcement des capacités et transfert des connaissances (CBKT) **62**
    - 10.8. Perspectives pour le futur **62**
    - 10.9. Conclusion **63**

Deuxième séance – 15 novembre 2022 (après-midi)

11. Compte rendu du directeur du BIPM sur les principales réalisations du BIPM **64**

12. Présentation du Projet de résolution A sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie **68**

13. Rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique : résultats et perspectives de l'atelier BIPM-OMM **70**

14. Rapport du président du CCQM **74**

15. Métrologie et exactitude des observations satellitaires des variables climatiques **81**

16. Rapport de la présidente du CCPR **84**

17. Rapport du président du CCT **89**

Troisième séance – 16 novembre 2022 (matin)

18. Le travail du JCTLM face au défi de la standardisation internationale des analyses cliniques en laboratoire **95**

19. Le rôle de la précision des diagnostics dans le cadre de la préparation métrologique à de potentielles futures pandémies **98**

20. Rapport de l'AIEA sur les activités de liaison **102**

21. Rapport du président du CCRI **104**

22. Rapport sur les finances du BIPM **112**

23. Présentation du programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027 **114**

24. Rapport de l'OIML sur les activités de liaison **117**

25. Normalisation, industrialisation et objectifs de développement durable de l'ONU **120**

26. Rapport sur les progrès effectués concernant la reconnaissance par l'UNESCO de la Journée mondiale de la métrologie **123**

27. Présentation du Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre » **123**

Quatrième séance – 17 novembre 2022 (matin)

28. Rapport du président du CCL **126**

29. Réglementation et infrastructure de la qualité : relever ces défis qu'un monde sépare **133**

30. Application des principes FAIR aux domaines de la recherche et des mesures **136**

31. Rapport de l'ISO sur les activités de liaison **140**

32. Rapport du président du CCU **142**

33. Présentation du projet de résolution C « Sur l'extension de la liste des préfixes du SI » **146**

34. Introduction au projet de résolution B « Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités » **148**

35. Synthèse des discussions suite à la réunion informelle sur la dotation **151**

36. Rapport des co-présidents du Groupe de travail ad hoc des représentants des États Membres **151**

Cinquième séance – 17 novembre 2022 (après-midi)

37. La métrologie du temps et des fréquences dans les missions spatiales **154**

38. Horloges optiques d'une précision de l'ordre de 10^{-18} : défis et applications **157**

39. Rapport du président du CCTF **161**

40. Présentation des projets de résolution D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC » et E « Sur la future redéfinition de la seconde » **164**

41. Rapport de l'OTICE sur les activités de liaison **169**

42. Rapport du président du CCAUV **172**

43. Rapport du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB) **179**

44. Rapport du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM) **180**

Sixième séance – 18 novembre 2022 (matin)

45. Mettre en œuvre le nouveau Système international (briser la chaîne invisible) **182**

46. Rapport du président du CCM **185**

47. La métrologie au service des réseaux d'énergie durables de demain **189**

48. Rapport du président du CCEM **192**

49. Présentation du Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » **197**

50. Vote du Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » **197**

51. Ouverture des votes pour l'élection du CIPM et de la Commission pour l'élection du CIPM **198**

52. Vote des projets de résolution A, B et C **199**

Septième séance – 18 novembre 2022 (après-midi)

53. Vote des projets de résolution D, E et F **201**

54. Annonce des résultats de l'élection du CIPM et de celle de la Commission pour l'élection du CIPM **201**

55. Projets de célébration du 150e anniversaire de la Convention du Mètre le 20 mai 2025 **203**

58. Questions diverses **204**

59. Clôture de la réunion **204**

Résolutions adoptées par la Conférence générale lors de sa 27e réunion 205

Résolution 1 – Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie **206**

Résolution 2 – Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités **208**

Résolution 3 – Sur l'extension de la liste des préfixes du SI **210**

Résolution 4 – Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC **211**

Résolution 5 – Sur la future redéfinition de la seconde **213**

Résolution 6 – Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre **214**

Résolution 7 – Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 **216**

Annexe A Convocation et Procédure spéciale **218**

Annexe B Projets proposés dans le programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027 **226**

Liste des sigles utilisés dans le présent volume 413

Liste des délégués et des invités à la 27e réunion de la Conférence générale des poids et mesures

Réunie à Versailles du 15 au 18 novembre 2022
sous la présidence de M. Patrick Flandrin
Président de l'Académie des sciences de l'Institut de France

Mesdames, Messieurs les délégués des États signataires de la Convention du Mètre et Associés à la Conférence générale des poids et mesures.

États Parties à la Convention du Mètre

(Le nom des chefs de délégation apparaît en gras et celui des chefs de délégation par intérim en italique ; le nom des membres du Comité international des poids et mesures est suivi d'un astérisque.)

Afrique du Sud

M. N. Mukhufhi, président-directeur général, National Metrology Institute of South Africa (NMISA), Pretoria.

M. T. Demana, directeur principal, Infrastructure technique, Département du commerce et de l'industrie (DTI), Pretoria.

M. M. Sehlapelo, directeur financier, NMISA.

Mme N. Moeketsi, DTI.

M. A. Mbele, DTI.

Mme W. Swartz, conseillère politique, ambassade d'Afrique du Sud en France, Paris.

M. M. Adams, conseiller, Section économique, ambassade d'Afrique du Sud en France.

Allemagne

Mme D. Brönstrup, directrice générale, ministère fédéral de l'Économie et de la protection du climat (BMWK), Berlin.

M. O. Janssen, directeur, BMWK.

M. A. Höll, directeur adjoint de division, BMWK.

Mme K. Gierschke, directrice adjointe de division, BMWK.

Mme C. Denz, présidente, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

M. F. Härtig, vice-président, PTB.

M. M. Kühne, conseiller, PTB.

Arabie saoudite

Son Excellence M. S. Al-Kasabi, gouverneur, Saudi Standards, Metrology and Quality Organization, National Measurement and Calibration Center (SASO-NMCC), Riyad.

M. I. bin Abdullah Al-Faleh, directeur général, SASO-NMCC, Riyad.

M. M. Al-Shahrani, directeur général du cabinet du gouverneur, SASO-NMCC.

M. R. bin Abdulaziz Al-Yousefi, directeur adjoint, Département des masses, SASO-NMCC.

Argentine

Son Excellence M. L. Costantino, ambassadeur de la République argentine en France, Paris.

M. R. Comelli, ministre conseiller, Section des organisations internationales économiques de l'ambassade de la République argentine en France.

Mme M. Finkielstoyn, secrétaire, Section des organisations internationales économiques de l'ambassade de la République argentine en France.

M. H. Laiz*, directeur de la métrologie, de la qualité et de l'environnement, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Buenos Aires.

Mme S. Meritano, conseillère, Section des organisations internationales économiques de l'Ambassade de la République argentine en France.

Australie

M. B. Warrington, directeur général et métrologiste en chef, National Measurement Institute, Australia (NMIA), Département de l'industrie, de la science et des ressources, Lindfield.

Mme V. Coleman, responsable de la section de nanométrologie, NMIA.

Mme A. Samuel, directrice des relations internationales, NMIA.

Autriche

Mme U. Fuchs, cheffe de la section de la métrologie, de l'expertise et de la géoinformation, ministère fédéral du Travail et de l'Économie, Vienne.

M. R. Edelmaier, vice-président, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Vienne.

Belarus

M. A. Burak, vice-président, State Committee for Standardization of the Republic of Belarus (Gosstandart), Minsk.

M. A. Pinchuk, chef du Département de la métrologie, Gosstandart.

Mme I. Nenartovich, cheffe adjointe du Département de la métrologie, Gosstandart.

M. A. Kazachok, directeur, Belarusian State Institute of Metrology (BelGIM), Minsk.

M.V. Hurevich, directeur adjoint, BelGIM.

Belgique

M. H. Pirée, conseiller, responsable du service Étalons nationaux au sein de la division Métrologie, Service public fédéral Économie, PME, Classes moyennes et Énergie, Direction générale de la Qualité et Sécurité, Bruxelles.

Brésil

Son Excellence M. C. M. Cozendey, ambassadeur, délégué du Brésil auprès des organisations internationales économiques, ambassade du Brésil en France, Paris.

M. M. Heleno Guerson de Oliveira Junior, président, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), Rio de Janeiro.

Mme D. Arruda Benjamin, ministre conseiller, déléguée adjointe du Brésil auprès des organisations internationales économiques, ambassade du Brésil en France.

M. A. Pinto Dib, deuxième secrétaire, délégation du Brésil auprès des organisations internationales économiques.

Mme O. Borrakuens Couceiro, directrice de la métrologie scientifique et de la technologie, INMETRO.

M. G. Palmeira Ripper, directeur adjoint de la métrologie scientifique et de la technologie, INMETRO.

M. D.E. Pizetta, coordinateur général des relations internationales, INMETRO.

M. J.A. Da Paz Cruz, coordinateur général des relations internationales, INMETRO.

M. M.A. Lima de Oliveira, assitant de la présidence, INMETRO.

M. A.L. Reboredo, assistant de la présidence, INMETRO.

M. M.N. Medeiros, directeur de la métrologie pour les sciences biologiques, INMETRO.

Mme L. Contier de Freitas, conseillère auprès de la direction de la métrologie scientifique et de la technologie, INMETRO.

M. A.L. de Sousa dos Santos, coordinateur général adjoint des relations internationales, INMETRO.

M. A.A. Cid, chercheur-technicien, INMETRO.

M. R.J. de Carvalho, Observatoire national / Division du service de l'heure (ON/DSHO) Rio de Janeiro.

M. P.S. Rocha, technicien, ON/DSHO.

M. H. S. Yozzi Codá, technicien, ON/DSHO.

Mme K.C. de Souza Patrao, responsable du Laboratoire national de métrologie des rayonnements ionisants / Institut de radioprotection et de dosimétrie CNEN (LNMRI/RD), Rio de Janeiro.

M. E.S. da Fonseca, chercheur (LNMRI/RD).

Mme E.M. de Oliveira, technicienne (LNMRI/RD).

Bulgarie

Non représentée, excusée.

Canada

Mme G. MacDonald, directrice générale Métrologie, Centre de recherche en métrologie, Conseil national de recherches du Canada (CNRC), Ottawa.

M. K. Thomson, directeur Recherche et développement, CNRC.

Mme M. Gertsvolf, cheffe d'équipe Fréquence et temps, CNRC.

M. J. Melanson, directeur Recherche et développement, CNRC.

M. R. White, chef de secteur Métrologie numérique, CNRC.

M. A. Steele*, retraité du CNRC.

Chili

Non représenté.

Chine

M. Qin Yizhi, vice-ministre, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China (SAMR), Beijing.

M. Liu Hongliang, directeur général, Département de la métrologie, SAMR.

M. Han Jianping, conseiller (niveau directeur général), Département de la coopération internationale, SAMR.

Mme Wang Yuhan, directrice-adjointe, Département de la coopération internationale, SAMR.

M. Duan Yuning*, vice-directeur général, National Institute of Metrology (NIM), Beijing.

M. Yang Ping, vice-président, NIM.

Mme Gao Wei, directrice, Département de la mécanique et de l'acoustique, NIM.

Mme Cai Juan, directrice adjointe, Département de la coopération internationale, NIM.

Colombie

M. H.A. Zùñiga Carvajal, directeur général, Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM Colombia), Bogotá.

Costa Rica

M. F.A. Monge, directeur, Laboratoire national de métrologie du Costa Rica, ministère de l'Économie, du commerce et de l'industrie (LACOMET), San Pedro Montes de Oca.

M. B. Calderon Jimenez, chef du Département de la métrologie en chimie, LACOMET.

Croatie

Mme B. Novosel, directrice générale, Bureau national de métrologie (DZM), Zagreb.

M. D. Zvizdic, Laboratoire de mesure de processus de la Faculté de génie et de construction navale (FSB-LPM), Zagreb.

Danemark

Non représenté.

Égypte

Mme N. Emad Mahmoud Khaled, présidente, National Institute of Standards (NIS), Le Caire.

Émirats arabes unis

Son Excellence Mme F.A. Al-Zarouni, sous-secrétaire adjoint par intérim pour le secteur des normes et de la législation, ministère de l'Industrie et des technologies avancées (MOIAT), Dubai.

Mme A. Hassan Al-Albastaki, directrice, Département de la métrologie, MOIAT.

Son Excellence M. S. Al-Muhairi, directeur exécutif, Institut de métrologie des Émirats arabes unis, Conseil de la qualité et de l'innovation (QCC), Abou Dabi.

M. M.A.A.Q. Al-Mulla, spécialiste principal de la qualité et de l'innovation, QCC.

M. A.A. Al-Menhali, directeur du département de la métrologie scientifique et industrielle, QCC.

Équateur

Non représenté, excusé.

Espagne

M. J. Á. Robles Carbonell, directeur, Centro Español de Metrología (CEM), Madrid.

Mme M.T. Lopez Esteban, directrice du service énergétique, environnemental et de la santé, CEM.

Estonie

M. A. Vaigu, directeur du laboratoire national de métrologie (AS METROSERT), Tallinn.

Mme M. Aru, cheffe de la division pour la recherche et le développement, AS METROSERT.

Mme T. Sallamaa, conseillère en métrologie et en évaluation de la conformité, ministère des Affaires économiques et de la communication, Tallinn.

États-Unis d'Amérique

Mme L. Locascio, sous-secrétaire au commerce chargé des questions relatives aux étalons et à la technologie, directrice du National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg.

*M. J. Olthoff**, directeur associé pour les Programmes des laboratoires, NIST.

Mme M. Dowell, directrice du laboratoire de technologie des communication, NIST.

M. J. Kushmerick, directeur du laboratoire de mesure des matériaux, NIST.

M. C. LaCrosse, agent des affaires étrangères, Bureau des agences spécialisées et techniques, Département d'État.

Mme C.M. Saundry, directrice, Office of International and Academic Affairs, NIST.

Mme D. Shorts, chargée de mission, affaires politiques/UNESCO, Section politique, ambassade des États-Unis d'Amérique en France, Paris.

Mme M. Walker, chargée de mission pour l'environnement, la science, la technologie et la santé, Section économique, ambassade des États-Unis d'Amérique en France, Paris.

Fédération de Russie

M. E. Lazarenko, directeur-adjoint, Federal Agency for Technical Regulating and Metrology (Rosstandart), Moscou.

M. F.V. Bulygin, premier directeur adjoint, VNIIMS, Moscou.*

M. S.I. Donchenko, directeur, All-Russian Scientific Research Institute of Physical Technical and Radiotechnical Measurements, Rosstandart (VNIIFTRI), Moscou.

Finlande

M. M. Heinonen, vice-président, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Centre for Metrology / Mittatekniikan keskus (VTT MIKES), Espoo.

Mme S. Hemminki, agent principal, métrologie légale, Finnish Safety and Chemicals Agency, Helsinki.

France

M. B. Van Maris, chef de la division métrologie, ministère de l'Économie et des finances, Paris.

M. T. Grenon, directeur général, Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Paris.

Mme M. Chambon, directrice de la recherche et du développement, LNE.

Mme S. Phulpin, adjointe au chef de la division métrologie, ministère de l'Économie et des Finances.

M. N. Dimarcq, directeur adjoint, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice.

M. C. Salomon, directeur de recherche, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Président du Comité science et métrologie de l'Académie des Sciences, Paris.

Grèce

Mme Georgia Rempoutsika, directrice générale, National Quality Infrastructure System (NQIS), Peristeri.

Hongrie

Mme Z. Szilágyi Nagyné, directrice, Département de la métrologie et de la supervision technique, Government Office of the Capital City Budapest (BFKH), Budapest.

Inde

M. V.G. Achanta, directeur, CSIR-National Physical Laboratory (NPLI), New Delhi.

Indonésie

Mme D. Zakiyah, directrice adjointe, Étalons de mesure nationaux, Directorate for National Measurement Standards of Mechanics, Radiation, and Biology and Directorate for National Measurement Standards of Thermoelectric and Chemistry, National Standardization Agency of Indonesia (SNSU-BSN), Jakarta.

M. G. Zaid, directeur, Étalons de mesures nationaux en thermoélectricité et chimie, Centre de recherche et développement en métrologie, SNSU-BSN.

Iran (République islamique d')

M. H. Khanehzar, président, Centre de métrologie, Iran National Standards Organization (INSO), Karaj.

M. M. Mohajeri Amiri, premier conseiller, ambassade de la République islamique d'Iran en France, Paris.

Iraq

M. S.A. Saadi, vice-chef physiciste, Central Organization for Standardization and Quality Control (COSQC), Bagdad.

M. A. Al-Mafragy, premier secrétaire, ambassade de la République d'Irak en France, Paris.

Irlande

Mme M. Buckley, directrice de la métrologie légale, National Standards Authority of Ireland, National Metrology Laboratory (NSAI NML), Dublin.

Israël

Mme N. Goldovsky, directrice, Laboratoire du temps et des fréquences, National Physical Laboratory of Israel (INPL), Jérusalem.

Italie

M. L. Gulino, directrice générale, Direction pour le marché, la concurrence, la tutelle du consommateur et la règlementation technique, ministère du Développement économique (MISE), Rome.

M. D.S. Wiersma, président, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Turin.

Mme D. La Marra, directrice, Direction pour le marché, la concurrence, la tutelle du consommateur et la règlementation technique (MISE).

M. P. de Felice, directeur, Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente - Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (ENEA-INMRI), Rome.

M. P. Vigo, vice-président, Organisme national italien d'accréditation, Accredia, Rome.

Mme A. Pastorelli, chargée d'affaires, délégation permanente de l'Italie auprès des Organisations internationales, Paris.

M. A. De Angelis, attaché scientifique, délégation permanente de l'Italie auprès des Organisations internationales.

M. M. Pinto, ENEA-INMRI, chef de la division dosimétrie, ENEA-INMRI.

Mme R. Biolchini, fonctionnaire, MISE.

M. G. Petrillo, fonctionnaire, division des Instruments de mesure et métaux précieux, MISE.

M. L. Gattinari, fonctionnaire, MISE.

Japon

M. T. Usuda*, directeur général, National Institute of Advanced and Industrial Science, National Metrology Institute of Japon (NMIJ/AIST), Tsukuba.

M. T. Kobata, directeur général adjoint, NMIJ/AIST.

M. S. Kurokawa, directeur, Bureau de la cooperation international, Center for Quality Management of Metrology, NMIJ/AIST.

M. T. Ohno, premier secrétaire, Affaires scientifiques, ambassade du Japon en France, Paris.

Mme A. Wakahara, directrice adjointe, Metrology Police Office, Industrial Science and Technology Policy and Environment Bureau, ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI), Tokyo.

M. N. Kinjo, fonctionnaire, Metrology Police Office, METI.

Kazakhstan

Mme G. Suieubayeva, cheffe du département des normes nationales, Republican State Enterprise "Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology (RSE "KazStandard"), Astana.

Mme E. Aibatyrova, experte en chef, Département international de la coopération et du système de certification, Committee for Standardization, Metrology and Certification (KAZMEMTS) RSE "KazStandard", Astana.

M. M. Faleyev, expert, Département de la métrologie et de la normalisation, KAZMEMTS.

M. A. Omirzak, conseiller du directeur général, Centre national d'accréditation, Astana.

Mme Y. Firsova, directrice de l'agence de l'Est, RSE "KazStandard".

M. R. Alibekov, conseiller, ambassade de la République du Kazakhstan en France, Paris.

M. B. Koishibayev, deuxième secrétaire, ambassade de la République du Kazakhstan en France, Paris.

M. G. Dugalol.

Kenya

Son Excellence Mme J. Wakhungu, ambassadrice du Kenya en France, Paris.

M. H.K. Rotich, directeur Métrologie et Essais, Kenya Bureau of Standards (KEBS), Nairobi.

M. J. Obwoge, responsable de la métrologie, KEBS.

Mme M. Ming'ala, premier conseiller, ambassade du Kenya en France, Paris.

Lituanie

Mme I. Golovačiova, cheffe de la Division des politiques de l'industrie 4.0, ministère de l'Industrie et de l'innovation, Vilnius.

Mme G. Krukonienė, conseillère de la Division des politiques de l'industrie 4.0, ministère de l'Industrie et de l'innovation.

M. A. Gudelis, chef de la direction scientifique du département de recherche nucléaire, Center for Physical Sciences and Technology, Vilnius.

Malaisie

M. O. Zakaria, directeur principal, National Metrology Laboratory (NMIM), Sepang, Selangor.

Maroc

M. K. Bakari, chef de la division de la métrologie et d'agrément des organismes d'inspection et d'évaluation, Direction générale du commerce, ministère de l'Industrie et du Commerce, Rabat.

Mme R. Bechchi, cheffe du service des agréments des organismes délégataires du contrôle des instruments de mesure et d'évaluation de la conformité, Direction générale du commerce, ministère de l'Industrie et du Commerce, Rabat.

M. M. Berrada, directeur général adjoint du Laboratoire public d'essais et d'études, Laboratoire national de métrologie (LPEE/LNM), Casablanca.

M. A. Ziti, directeur du laboratoire national de métrologie, LPEE/LNM.

Mexique

M. I.A. Castelazo Sinencio*.

M. R. Romero, coordinateur de l'infrastucture de la qualité, Secrétariat à l'Économie, Mexico.

Mme M. Delia López, sous-directrice, Secrétariat à l'Économie, Mexico.

Monténégro

Mme G. Bajić, directrice, Bureau of Metrology (BMM), Podgorica.

Norvège

M. G. Samuelsen, directeur général, Norwegian Metrology Service, Justervesenet (JV), Kjeller.

M. H.A. Frøystein, directeur de département, JV.

Nouvelle-Zélande

Mme A. Koo, directrice, Measurement Standards Laboratory of New Zealand (MSL), Lower Hutt.

Pakistan

Non représenté.

Pays-Bas

M. W. de Waal, conseiller en politique de coordination, ministère des Affaires économiques et de la Politique climatique, La Haye.

Mme F. van Booma - de Smit, directrice générale, VSL, Delft.

*M. G. Rietveld**, scientifique senior, VSL.

Pologne

M. J. Semaniak, président, Central Office of Measures/Glówny Urzad Miar (GUM), Varsovie.

M. M. Mikiel, spécialiste en chef, Département de la stratégie, GUM.

Portugal

Mme I. Godinho, directrice, Département de la métrologie, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica.

République de Corée

Mme H. Park, présidente, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon.

M. S.-R. Park*, chercheur scientifique principal, Mesure biomoléculaire, KRISS.

M. N.-W. Kang, directeur, Division de la métrologie physique, KRISS.

M. S.-I. Lee, directeur, Division de la métrologie chimique et biologique, KRISS.

M. S.-W. Baek, directeur, Division de la politique et de la stratégie, KRISS.

M. I.-Y. Hwang, chef, Bureau de la coopération internationale, KRISS.

Mme S. Kim, chef de projet, Bureau de la coopération internationale, KRISS.

M. J.-K. Cho, chercheur, Division de la politique normative, Koera Agency for Technology and Standards (KATS), Chungcheongbuk.

Roumanie

M. G.F. Popa, directeur, Institutul National de Metrologie (INM), Bucarest.

Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord

Mme M. Turner, directrice des programmes de mesure nationaux, Innovation for Infrastructure, Department for Business, Innovation and Skills (BIS), Teddington.

M. P.A. Thompson, directeur général, National Physical Laboratory (NPL), Teddington.

M. J.T. Janssen, scientifique en chef, NPL.

M. R.J.C. Brown, responsable de la métrologie, NPL.

M. R.J. Gunn, responsable de l'international, NPL.

M. M.R. Sené*, NPL.

M. J.H. Braybrook, Government Chemist, LGC ltd (LGC), Teddington.

Serbie

Non représentée.

Singapour

M. G. Gow, directeur exécutif, National Metrology Centre, Agency for Science, Technology and Research (A*STAR), Singapour.

M. O.T. Ngan, directeur adjoint, unité recherche et développement, A*STAR.

M. S.W. Chua, responsable et métrologiste principal pour la métrologie électrique, A*STAR.

Slovaquie

M. T. Peták, vice-président, Slovak Office of Standards, Metrology and Testing (UNMS), Bratislava.

M. J. Boris, directeur du département de la métrologie, UNMS.

M. M. Kamenský, directeur général, Slovak Institute of Metrology (SMU), Bratislava.

Slovénie

M. S. Kopač, directeur, Metrology Institute of the Republic of Slovenia (MIRS), ministère de l'Enseignement supérieur, de la Science et de la Technologie, Celje.

Suède

M. T. Kampmann, directrice de département, Industrial Technnologies, Agence gouvernementale suédoise pour les systèmes d'information (Vinnova), ministère de l'Entreprise, Stockholm.

M. P. Åslund, chef de département, développement industriel, Vinnova.

M. J. Johansson, directeur, Institut de recherche suédois (RISE), Borås.

Suisse

M. P. Richard*, directeur, Institut fédéral de métrologie (METAS), Berne-Wabern.

M. B. Mathew, directeur-adjoint, METAS.

Tchéquie

M. V. Pokorny, président, Czech Office for Standards, Metrology and Testing (UNMZ), Prague.

M. P. Klenovsky, directeur adjoint pour la métrologie fondamentale, Czech Metrology Institute (CMI), Brno.

M. J. Tesar, directeur général, CMI.

Thaïlande

Mme A. Charoensook, directrice, National Institute of Metrology (Thailand) (NIMT), Pathum Thani.

Tunisie

M. F. Fadhli, directeur général, Agence nationale de métrologie (ANM), Tunis.

Mme J. Zouaoui, Laboratoire de Métrologie de la Direction générale des Transmissions et de l'Informatique (DEF-NAT), Tunis.

Mme H. Klich, Institut national de recherche et d'analyse physico-chimique (INRAP), Ariana-Tunis.

Türkiye

M. H.H. Mutlu, directeur général adjoint de la métrologie, ministère de l'Industrie et de la Technologie, Ankara.

M. M. Cetintas, directeur, National Metrology Institute of Türkiye (UME), Gebze-Kocaeli.

Ukraine

M. I. Brovchenko, vice-ministre, ministère du Développement économique et du Commerce, Kiev.

M. L. Vitkin, directeur, Département de la règlementation technique, ministère du Développement économique et du Commerce.

M. P. Neyezhmakov, directeur-général, National Scientific Centre "Institute of Metrology", Kiev.

M. I. Kuzmenko, directeur général adjoint, Métrologie, évaluation de la conformité des équipements de mesure et des activités scientifiques, State Enterprise “All-Ukrainian State Scientific and Production Center of Standardization, Metrology, Certification and Consumer Protection” (SE “Ukrmetrteststandard”), Kiev.

Uruguay

M. D. Volpe, directeur des analyses, des essais et de la métrologie, Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Montevideo.

États et Entités économiques Associés à la Conférence générale

Albanie

Non représentée.

Azerbaïdjan

M. A. Rovshan Bafa, directeur général adjoint, directeur général par interim, Azerbaijan Institute of Metrology (AzMI), Bakou.

M. P. Parviz, conseiller technique du directeur général, AzMI.

Bangladesh

Non représenté.

Bolivie (État plurinational de)

Mme M.M. Delgado de Meave, directrice générale exécutive, Institut bolivien de métrologie (IBMETRO), La Paz.

Bosnie-Herzégovine

M. Z. Džemić, directeur général, Institute of Metrology of Bosnia and Herzegovina (IMBIH), Sarajevo.

Botswana

Non représenté.

Cambodge

M. S. Oum, conseiller, ambassade du Royaume du Cambodge en France, Paris.

CARICOM

M. N. Best, Caricom Regional Organisation for Standards and Quality (CROSQ), Belville, St Michael.

M. D. Omar, CROSQ.

M. R. Medford, CROSQ.

Éthiopie

Son Excellence M. E. Mekonnen Alemae, ministre d'état, ministère du Commerce et de l'intégration régionale, Addis-Abeba.

M. A. Abagibe Adem, directeur général, Laboratoire national de métrologie de l'Éthiopie (NMIE), Addis-Abeba.

M. M.A. Mohammed, directeur général adjoint, NMIE.

M. M. Derebew Damtew, conseiller technique, NMIE.

Géorgie

Mme N. Mikanadze, directrice de la métrologie, Georgian National Agency for Standards and Metrology (GEOSTM), ministère de l'Économie et du Développement durable, Tbilisi.

Ghana

M. P.I.K. Arthur, directeur de la métrologie, Ghana Standards Authority (GSA), Accra.

M. S. Bedu-Addo, chef de la métrologie légale, GSA.

Hong Kong, Chine

M. K.-W. Chen, directeur, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region Standards and Calibration Laboratory (SCL), Wanchai.

Jamaïque

Non représentée.

Koweït

M. M. Al-Mutairi, ingénieur, Public Authority for industry (PAI), Safat.

Mme T. Alrabah, attachée diplomatique, ambassade du Koweït en France, Paris.

Mme S. Bokhadhour, attachée diplomatique, ambassade du Koweït en France.

Lettonie

Non représentée.

Luxembourg

M. C. Liesch, adjoint à la direction, Institut luxembourgeois de la normalisation, de l'accréditation, de la sécurité et qualité des produits et services (ILNAS), Luxembourg.

M. C. Schumacher, responsable adjoint du laboratoire de métrologie, ILNAS.

Macédoine du Nord

Mme M. Mustafai, directrice, Bureau of Metrology (BOM), ministère de l'Économie, Skopje.

Mme B. Mangutova Stoilkovska, responsable de la qualité et responsable technique du laboratoire de masse, BOM.

Malte

Non représenté.

Maurice

Non représenté.

Mongolie

M. B. Bilguun, président, Mongolian Agency for Standardization and Metrology, Ulaanbaatar.

M. D. Narangerel, directeur du service de la politique métrologique, MASM.

Namibie

Non représentée.

Oman

Non représenté.

Ouzbékistan

M. Z.N. Shukurov, directeur général adjoint, Uzbekistan Agency for Technical Regulation (UzSTANDARD Agency), Tashkent.

M. B.K. Allaev, directeur adjoint du département de la coopération internationale, UzSTANDARD Agency.

M. L.F. Saidoripov, directeur, Uzbek National Institute of Metrology of Uzstandard Agency (UzNIM), Tashkent.

M. M.R. Yunusov, directeur du centre d'étalonnage et du service de mesure, UzNIM

Panama

Non représenté.

Paraguay

Non représenté.

Pérou

Non représenté.

Philippines

Non représentées.

Qatar

M. M. Almusallam, président, Qatar General Organization for Standards and Metrology (QGOSM), Doha.

M. M. Alsheeb, directeur des relations publiques, QGOSM.

République arabe syrienne

Non représentée.

République de Moldova

Non représentée.

Sri Lanka

Non représenté.

Taipei chinois

M. S.-C. Wang, directeur de la quatrième division, Bureau of Standards, Metrology and Inspection, (BSMI), ministère des Affaires économiques, Hsinchu.

M. T.-Y. Lin, directeur général, Industrial Technology Research Institute, Center for Measurement Standards (CMS/ITRI), Hsinchu.

M. Y.-P. Lan, directeur général adjoint, CMS/ITRI.

M. J-C. Wang, responsable, CMS/ITRI.

M. C.-H. Liao, chercheur en chef, Telecommunication Laboratories, ChungHwa Telecom Co. Ltd (TL), Taoyuan City.

M. H.-T. Lin, chercheur en chef, TL.

M. M.-C. Yuan, directeur adjoint, National Radiation Standard Laboratory of the Institute of Nuclear Energy Research (NRSL/INER), Taoyuan City.

M. C.-H. Chu, chercheur, NRSL/INER.

M. Y.-C. Lin, chercheur associé, NRSL/INER.

Tanzanie

Non représentée.

Viet Nam

Mme T.N.H. Ngo, directrice, Vietnam Metrology Institute - Directorate for Standards and Quality (VMI-STAMEQ), Ha Noi.

Mme T.H. Dao, directrice recherche et développement, VMI.

Mme T.K.L. Nguyen, agent du Département de la planification et de la coopération, VMI.

Zambie

Non représentée.

Zimbabwe

M. C. Ngwenya, superintendant pour le commerce et les mesures, ministère de l'Industrie et du Commerce, Harare.

M. R. Mafoti, président-directeur général, Scientific & Industrial Research & Development Centre (SIRDC), Harare.

M. E. Zinyuke, ministre-conseiller, ambassade du Zimbabwe en France, Paris.

M. L. Madzingaidzo, directeur exécutif, SIRDC.

M. M. Ranganai, directeur, Laboratoire national de métrologie, SIRDC.

M. L. Mhuru, conseiller, ambassade du Zimbabwe en France.

M. E. Mavhunga, économiste, ministère de l'Industrie et du Commerce.

Ont assisté à la Conférence

Mme S. Bouaziz, présidente, Arab Program for Scientific and Industrial Metrology (ARAMET).

Mme M.D. Del Campo Maldonado, membre du CIPM.

M. W. Louw, président du CIPM.

M. L. Érard, ancien membre du CIPM.

M. J.-R. Flitz, Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Paris.

M. M. Kjær, directeur, Danish Fundamental Metrology (DFM), Lyngby.

Mme M.L. Rastello, membre du CIPM.

M. J. Ullrich, vice-président du CIPM.

M. M. Milton, directeur, Bureau international des poids et mesures (BIPM), Sèvres.

Les représentants des organisations intergouvernementales et organismes internationaux suivants :

Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)

- Mme Z. Msimang[§], radiophysicienne médicale et responsable du réseau des laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie (LSED).

Agence spatiale européenne (ESA)

- M. F.J. Benedicto Ruiz[§], directeur de la navigation.
- M. C. Donlon[§], directeur de la section Surface et structure interne de la Terre, Centre européen de recherche et de technologies spatiales (ESTEC).
- M. P. Waller, ingénieur, ESTEC.

Committee on Data for Science and Technology (CODATA)

- M. S. Hodson[§], directeur exécutif.

Commission internationale de l'éclairage (CIE)

- M. P. Blattner, président.
- Mme J. Veitch, vice-présidente technique.
- M. T. Bergen, directeur de la division 2.
- Mme K. Nield, secrétaire générale.

International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC)

- M. G. Miller[§], consultant de la division scientifique.

International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)

- M. E. Oehlenschlaeger, responsable du Comité sur l'accréditation.

[§] Également invité(e) en tant qu'intervenant.

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)

- Mme M. Karttunen§, analyste des politiques, Division de la politique réglementaire.

Organisation internationale de normalisation (ISO)

- Mme C. Draghici§, responsable de l'Unité d'évaluation de la conformité et des questions de consommation.

Organisation internationale de métrologie légale (OIML)

- M. A. Donnellan§, directeur du Bureau international de métrologie légale, BIML.
- M. B. Mathew, second vice-président du Comité international de métrologie légale, CIML.

Organisation météorologique mondiale (OMM)

- M. A. Rea§, directeur du département des infrastructures.

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI)

- M. Y. Yasunaga§, directeur de la direction des services et des opérations.

Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE)

- M. B. Doury§, ingénieur en imagerie sismique acoustique.

Union internationale des télécommunications (UIT)

- M. M. Maniewicz, directeur du Bureau des radiocommunications.
- M. J. Achkar, président du groupe de travail UIT R WP7A.
- M. V. Nozdrin, UIT-R, conseiller pour le groupe d'études 7.

Les intervenants invités suivants :

Mme S. Berlijn, professeure, chef de projet pour la transition énergétique numérique durable et résiliente, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.

M. C. Salomon, directeur de recherche, Centre national pour la recherche scientifique (CNRS), Paris.

M. S. Schlamminger, physicien, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg.

Mme M. Zambon, directrice des services de référence sur la grippe, les infections respiratoires, la virologie et la poliomyélite, Agence britannique de sécurité sanitaire (UKHSA).

Quelques membres du personnel du BIPM.

Comptes rendus de la 27e réunion

de la Conférence générale

des poids et mesures

15-18 novembre 2022

Ordre du jour

Première séance – 15 novembre 2022 (matin)

1. Présentation des titres accréditant les délégués
2. Ouverture de la réunion par M. le président de l'Académie des sciences, président de la CGPM *(P. Flandrin, Académie des sciences)*
3. Discours d'ouverture donné par M. le directeur général du Laboratoire national de métrologie et d'essais au nom de la République française *(T. Grenon, LNE)*
4. Réponse de M. le Président du Comité international des poids et mesures *(W. Louw, CIPM)*
5. Discours de M. le président de l'Académie des sciences de Paris *(P. Flandrin, Académie des sciences)*
6. Nomination du secrétaire de la CGPM *(P. Flandrin, Académie des sciences)*
7. Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter *(T. Usuda, CIPM)*
8. Approbation de l'ordre du jour *(P. Flandrin, Académie des sciences)*
9. Approbation de la procédure spéciale (*T. Usuda, CIPM)*
10. Rapport du président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 26e réunion de la CGPM *(W. Louw, CIPM)*

Deuxième séance – 15 novembre 2022 (après-midi)

11. Compte rendu du directeur du BIPM sur les principales réalisations du BIPM *(M. Milton, BIPM)*
12. Présentation du Projet de résolution A sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie *(G. Rietveld, CIPM, et D. del Campo, CIPM)*
13. Rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique : résultats et perspectives de l'atelier BIPM-OMM *(A. Rea, OMM)*
14. Rapport du président du CCQM *(S.-R. Park, CIPM)*
15. Métrologie et exactitude des observations satellitaires des variables climatiques *(C. Donlon, ESA)*
16. Rapport de la présidente du CCPR *(M.L. Rastello, CIPM)*
17. Rapport du président du CCT *(Y. Duan, CIPM)*

Troisième séance – 16 novembre 2022 (matin)

18. Le travail du JCTLM face au défi de la standardisation internationale des analyses cliniques en laboratoire *(G. Miller, IFCC)*
19. Le rôle de la précision des diagnostics dans le cadre de la préparation métrologique à de potentielles futures pandémies *(M. Zambon, HSE)*
20. Rapport de l'AIEA sur les activités de liaison *(Z. Msimang, AIEA)*
21. Rapport du président du CCRI *(M. Sené, CIPM)*
22. Rapport sur les finances du BIPM *(P. Richard, CIPM)*

23. Présentation du programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027 *(M. Milton, BIPM)*
24. Rapport de l'OIML sur les activités de liaison *(A. Donellan, OIML)*
25. Normalisation, industrialisation et objectifs de développement durable de l'ONU *(Y. Yasunaga, ONUDI)*
26. Rapport sur les progrès effectués concernant la reconnaissance par l'UNESCO de la Journée mondiale de la métrologie *(R. Alibekov, représentant de l'ambassade du Kazakhstan à Paris)*
27. Présentation du Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre » *(A. Steele, CIPM, et A. Samuel, NMIA)*

Quatrième séance – 17 novembre 2022 (matin)

28. Rapport du président du CCL *(I. Castelazo, CIPM)*
29. Réglementation et infrastructure de la qualité : relever ces défis qu'un monde sépare *(M. Karttunen, OCDE)*
30. Application des principes FAIR aux domaines de la recherche et des mesures *(S. Hodson, CODATA)*
31. Rapport de l'ISO sur les activités de liaison *(C. Draghici, ISO)*
32. Rapport du président du CCU *(J. Ullrich, CIPM)*
33. Présentation du projet de résolution C « Sur l'extension de la liste des préfixes du SI » *(R. Brown, NPL)*
34. Introduction au projet de résolution B « Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités » *(J. Ullrich, CIPM)*
35. Synthèse des discussions suite à la réunion informelle sur la dotation *(W. Louw, CIPM)*
36. Rapport des co-présidents du Groupe de travail *ad hoc* des représentants des États Membres *(R. Gunn, Royaume-Uni et D. Benjamin, Brésil)*

Cinquième séance – 17 novembre 2022 (après-midi)

37. La métrologie du temps et des fréquences dans les missions spatiales *(J. Benedicto, ESA)*
38. Horloges optiques d'une précision de l'ordre de 10−18 : défis et applications *(C. Salomon, CNRS)*
39. Rapport du président du CCTF *(N. Dimarcq, CIPM)*
40. Présentation des projets de résolution D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC » et E « Sur la future redéfinition de la seconde » *(N. Dimarcq, CIPM)*
41. Rapport de l'OTICE sur les activités de liaison *(B. Doury, OTICE)*
42. Rapport du président du CCAUV *(H. Laiz, CIPM)*
43. Rapport du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB) *(J. Olthoff, CIPM)*
44. Rapport du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM) *(P. Neyezhmakov, CIPM)*

Sixième séance – 18 novembre 2022 (matin)

45. Mettre en œuvre le nouveau Système international (briser la chaîne invisible) *(S. Schlamminger, NIST)*
46. Rapport du président du CCM *(P. Richard, CIPM)*
47. La métrologie au service des réseaux d'énergie durables de demain *(S. Berlijn, KTH)*
48. Rapport du président du CCEM *(G. Rietveld, CIPM)*
49. Présentation du Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » *(W. Louw, CIPM)*
50. Vote du Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » *(P. Flandrin, Académie des sciences)*
51. Ouverture des votes pour l'élection du CIPM et de la Commission pour l'élection du CIPM *(R. Gunn, Royaume-Uni)*
52. Vote des projets de résolution A, B et C *(P. Flandrin, Académie des sciences)*

Septième séance – 18 novembre 2022 (après-midi)

53. Vote des projets de résolution D, E et F *(P. Flandrin, Académie des sciences)*
54. Annonce des résultats de l'élection du CIPM et de celle de la Commission pour l'élection du CIPM *(Scrutateur externe)*
55. Projets de célébration du 150e anniversaire de la Convention du Mètre le 20 mai 2025 *(W. Louw, CIPM)*
56. Questions diverses
57. Clôture de la réunion

Première séance – 15 novembre 2022 (matin)

1. Présentation des titres accréditant les délégués

Comme requis dans la Convocation à la 27e réunion (2022) de la Conférence générale des poids et mesures (ci-après CGPM ou Conférence générale), les délégués ont dû présenter les titres d'accréditation remis par leur Gouvernement ou autorité concernée.

2. Ouverture de la réunion par M. le président de l'Académie des sciences, président de la CGPM

M. Patrick Flandrin, président de l'Académie des sciences de Paris et président de la CGPM, ouvre la séance inaugurale de la 27e réunion de la CGPM le 15 novembre 2022 en donnant l'allocution suivante :

« Monsieur le directeur du Laboratoire national de métrologie et d'essais, Monsieur le président du CIPM, Monsieur le directeur du BIPM, Mesdames et Messieurs les délégués, chers collègues, Mesdames et Messieurs,

Il échoit au président de l'Académie des sciences de présider la Conférence générale des poids et mesures et c'est à ce titre que je prends la parole en cette séance d'ouverture. Cette disposition m'honore et m'oblige, et je souhaite partager avec vous, ainsi qu'avec les délégations des nombreux pays représentés ici, le plaisir que j'ai à vous accueillir aujourd'hui à Versailles pour cette 27e Conférence générale des poids et mesures.

Cette Conférence a été préparée avec soin et efficacité par le secrétariat du Bureau international des poids et mesures, organisation internationale créée en 1875 par la Convention du Mètre, dont la principale mission est d'assurer et de promouvoir l'harmonisation mondiale des mesures. Je tiens à féliciter et à remercier l'ensemble des membres de son personnel.

Au nom de l'Académie des sciences, je vous souhaite à toutes et à tous une excellente 27e Conférence générale faite d'interaction, de dialogue et d'échanges dont je ne doute pas qu'ils seront fructueux.

Je vais maintenant donner la parole à Monsieur Thomas Grenon, directeur du Laboratoire national de métrologie et d'essais pour le discours d'ouverture officiel. »

3. Discours d'ouverture donné par M. le directeur général du Laboratoire national de métrologie et d'essais au nom de la République française

M. Thomas Grenon, directeur général du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), ouvre officiellement la 27e réunion de la CGPM en prononçant l'allocution suivante :

« Monsieur le président de l'Académie des sciences, Monsieur le président du Comité international des poids et mesures, Monsieur le directeur du Bureau international des poids et mesures, Mesdames et Messieurs les délégués, Mesdames et Messieurs, chers collègues,

Au nom du Gouvernement de la République française, j'ai le grand honneur et le plaisir de vous accueillir aujourd'hui à Versailles à l'occasion de l'ouverture de cette 27e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM).

La France a le privilège d'être, depuis 1875, dépositaire de la Convention du Mètre, signée à Paris à l'époque par dix-sept États, dans le but, comme le mentionne le préambule de cette convention, d'« assurer l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique ». Ce traité international a institué la création d'une autorité mondiale dans le domaine de la métrologie, le Bureau international des poids et mesures (BIPM), fonctionnant sous la responsabilité d'un Comité international des poids et mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), pour laquelle nous nous trouvons aujourd'hui rassemblés. Si la mission principale du Bureau international des poids et mesures était, à l'origine, la conservation des étalons, celle-ci n'a cessé d'évoluer avec l'accroissement des échanges, le développement des sciences et des techniques, l'émergence des enjeux globaux, et bien sûr la dématérialisation des étalons. Pour la France, il est clair que le BIPM est bien une organisation internationale, quand bien même la Convention, à l'époque, ne le précisait pas. Le BIPM dispose à ce titre d'une personnalité juridique distincte de celle des États Membres qui lui permet en particulier de conclure des accords internationaux. C'est la raison pour laquelle la France a conclu un accord de siège avec cette organisation.

La Convention du mètre est aujourd'hui ratifiée par 64 États Membres et 36 États Associés à la CGPM, et fêtera très bientôt son 150e anniversaire le 20 mai 2025 ; votre présence nombreuse aujourd'hui montre la vigueur de l'organisation.

En 2018, nous avons vécu la 26e réunion de la Conférence générale avec beaucoup d'émotion, conférence exceptionnelle qui a vu l'adoption d'une résolution visant à redéfinir quatre des sept unités de base que compte le Système international d'unités. Depuis, cette résolution a été appliquée par un grand nombre d'États Membres, et nous nous en réjouissons.

Discipline scientifique transverse, à la pointe de la recherche et de l'innovation, la métrologie omniprésente dans la vie quotidienne est essentielle à l'évolution de notre société et aux développements durables de notre économie et de notre industrie, essentielle à la sécurité et à la santé de nos concitoyens, et je pense à la pandémie qui nous a tous durement touché, je pense aussi au défi que pose le réchauffement de notre planète, nous y reviendrons tout au long de cette conférence.

Nous sommes aussi tous conscients des défis sociétaux et mondiaux actuels, protection de la biodiversité, changement climatique, santé personnalisée, développement de l'intelligence artificielle dans de nombreux domaines, sécurité alimentaire, problèmes énergétiques, technologies quantiques, je pourrais citer de nombreux domaines en pleine évolution. La transformation numérique s'accélère avec de nouveaux sujets comme la qualification de données de masse, la gestion de ces données et leur intégration dans des systèmes et instrumentations de plus en plus complexes, les jumeaux numériques et les machines apprenantes. La métrologie se doit d'être présente à tous ces défis et permettre d'assurer la fiabilité et la confiance dans ces nouveaux outils essentiels à leur développement, essentiels à leur acceptabilité.

Que de champs d'investigation en cours et à venir pour notre science !

La métrologie a su s'adapter aux différentes révolutions industrielles et technologiques tout au long de notre histoire. Les différents prix Nobel qui ont marqué notre science, qui ont contribué aux progrès de la métrologie en sont une démonstration forte : Albert Michelson, Charles-Édouard Guillaume, Bryan Josephson, Klaus von Klitzing, Norman Ramsey, Bill Philips, Stephan Chu, Claude Cohen-Tannoudji, John Hall et très récemment Alain Aspect dont je connais l'attachement à la métrologie.

L'amélioration continue du Système international d'unités est fondamentale pour accompagner les avancées scientifiques et les enjeux technologiques.

Aujourd'hui, les travaux de nombreux laboratoires nationaux de métrologie ont démontré que l'exactitude des étalons de fréquence optiques, fondés sur différentes espèces et transitions, dépasse l'exactitude pouvant être atteinte par l'actuelle mise en pratique de la définition de la seconde, à partir d'une transition du césium, et ceci d'environ un facteur 100, ce qui est considérable. Ces avancées permettent d'envisager d'améliorer la réalisation et la dissémination des échelles de temps, en particulier du Temps universel coordonné (UTC). Cette Conférence va pouvoir discuter et débattre d'une feuille de route pour proposer une nouvelle définition de la seconde, d'ici quelques années, comme cela nous sera exposé lors de la présentation des travaux du Comité Consultatif du temps et des fréquences (CCTF). Une nouvelle aventure qui se présente, toujours pour mieux répondre aux besoins futurs de l'industrie et de la société.

Le Temps universel coordonné (UTC) est l'unique échelle de temps recommandée comme référence internationale et est à la base du temps civil dans la plupart des pays. Son utilisation comme unique échelle de temps de référence pour l'ensemble des applications, y compris les réseaux numériques avancés et les systèmes satellitaires, requiert de le définir de façon claire et de maintenir son accord avec le Temps atomique international.

Depuis sa création, le BIPM a su faire évoluer ses missions afin de répondre aux besoins de la communauté internationale. Il a su aussi améliorer l'efficacité de son fonctionnement et je tenais à le souligner aujourd'hui. Il est clair qu'en cette période de situation financière mondiale extrêmement tendue et de contraintes budgétaires fortes imposées aux États Membres, il est indispensable que le BIPM puisse continuer à remplir sa mission d'organisation intergouvernementale scientifique, experte dans le domaine de la métrologie. En parallèle, le soutien apporté au BIPM, notamment par les laboratoires nationaux de métrologie, doit être salué et doit perdurer.

Je crois essentiel de poursuivre la coopération scientifique qui permet de soutenir cette vision d'une métrologie internationale. L'ambition d'une participation universelle du plus grand nombre, affichée depuis 1921 dans la Convention, doit être maintenue afin de permettre la réalisation d'un idéal scientifique qui a été porté par la Révolution française, un système de mesure universel s'adressant, je cite, « à tous les temps à tous les peuples ».

Je suis convaincu que les Résolutions qui seront adoptées au cours de cette réunion de la Conférence générale des poids et mesures continueront à servir les intérêts de la communauté internationale, dans ce même esprit qui animait ses fondateurs. Je vous remercie et je vous souhaite à tous une excellente 27e Conférence générale des poids et mesures. »

4. Réponse de M. le président du CIPM

W. Louw, président du Comité international des poids et mesures (ci-après CIPM), remercie M. Grenon pour son allocution et ses paroles de bienvenue. Il souligne que le monde reconnaît le rôle majeur joué par la France dans l'invention et l'établissement du système métrique. La France est le dépositaire de la Convention du Mètre, sous l'autorité de laquelle les délégués se réunissent, et elle héberge le siège du BIPM à Sèvres. La science est le moteur le plus puissant de la mondialisation. La science est également essentielle aux progrès des mesures et de la métrologie. La science de la mesure est indissociable des avancées effectuées en matière de technologies nouvelles ou émergentes,

en particulier dans les domaines de l'environnement, de la biotechnologie, des essais médicaux, et d'un secteur très actuel, la transformation numérique. M. Louw observe que les représentants des dix-sept nations qui ont signé la Convention du Mètre en 1875 seraient agréablement surpris de voir les progrès accomplis depuis. Beaucoup reste à faire, dont une partie sera à l'ordre du jour de la 27e réunion de la CGPM. M. Louw remercie les délégués de contribuer à ces progrès et remercie à nouveau M. Grenon pour son discours.

5. Discours de M. le président de l'Académie des sciences de Paris

M. Flandrin, président de l'Académie des sciences de Paris et président de la CGPM, prononce l'allocution suivante :

« Mesdames et Messieurs,

Il y a quatre ans, un pas spectaculaire a été franchi avec l'adoption d'une révision majeure du Système international d'unités (SI) qui définit désormais les sept unités de base à partir de la valeur numérique fixée de constantes physiques choisies, ce qui bouscule des habitudes mais ouvre de nouvelles perspectives.

En introduction à la 26e Conférence générale qui a vu cet avènement remarquable, le président de l'Académie des sciences de l'époque, Sébastien Candel, avait rappelé comment l'évolution vers le Système international d'unités avait pour origine l'élan réformateur, universaliste et unificateur de la Révolution française et le rôle que l'Académie des sciences avait joué dans sa définition et sa mise en place. Sans revenir sur tous les aspects de l'aventure scientifique, politique et sociétale que cela a pu représenter, il est bon d'en rappeler quelques éléments car les principes qui ont présidé à cette élaboration et à sa mise en place restent plus que jamais d'actualité.

Il faut se souvenir qu'avant la Révolution française, le paysage était des plus disparates. La diversité des unités de mesure et l'imprécision de leurs définitions nuisaient à l'économie et aux échanges commerciaux et, même si l'unification des poids et mesures étaient clairement une revendication importante des cahiers de doléances de 1789, cela n'était pas propre à la France mais partagé à l'échelle au moins européenne. Ce qui était vrai d'un point de vue économique l'était également d'un point de vue scientifique, la difficulté de disposer de références communes marquant un frein évident à la coopération internationale en limitant les possibilités de partage des mesures et des observations faites dans les différents États.

C'est à la veille de la Révolution française, le 27 juin 1789, que l'Académie des sciences crée pour y remédier une commission chargé d'uniformiser les poids et mesures. Moins d'un mois plus tard, le 25 juillet 1789, c'est le Royaume de Grande-Bretagne qui propose une première mesure d'uniformisation en préconisant l'usage d'une unité de longueur définie comme celle d'un pendule battant la seconde à la latitude de Londres. Sous l'impulsion de Talleyrand, l'Assemblée constituante propose le 9 mars 1790 que soit établi un système unique de mesures qui soit, je cite, « basé sur un prototype invariable, pris dans la nature ». L'idée est que cette mission soit confiée conjointement à l'Académie des sciences et à la Royal Society mais cela fera long feu. En effet, l'Académie des sciences émet très rapidement, dès le 8 mai 1790, deux préconisations, à savoir d'une part le choix d'une unité de longueur dans l'esprit de la proposition britannique mais sans référence de latitude, et d'autre part l'adoption d'une échelle décimale pour les poids, les mesures et les monnaies. Las, les Britanniques ayant refusé la collaboration proposée par la France, les chemins d'une première unification possible se séparent et l'Académie des sciences renonce en mars 1791 à baser l'étalon de longueur sur le pendule battant la seconde, lui préférant la dix millionième partie

du quart du méridien terrestre, que des expéditions commanditées par ses soins venaient d'évaluer avec précision. Ainsi naîtra officiellement le mètre le 11 juillet 1792 et, grâce à l'adoption du système décimal, ses unités liées dans des rapports de dix, « décimètre », « centimètre », etc. Il faudra ensuite attendre le 10 décembre 1799 pour que le « mètre définitif » soit adopté à l'issue d'un premier congrès international regroupant des savants des pays alliés de la France.

Si c'est une chose de décider de nouvelles unités, c'en est une autre de les faire accepter. Dans un registre différent, nous autres européens avons pu nous en convaincre récemment avec l'introduction de l'euro comme monnaie commune. Rompre les usages pour passer de la théorie à la pratique nécessitera ainsi encore du temps, et en France une loi, pour imposer au 1er janvier 1840 l'usage unique et définitif du système métrique. Ce sera ensuite en 1875 la « Convention du Mètre », qui donnera corps à un mètre-étalon physique et qui donnera naissance au Bureau international des poids et mesures, organisation internationale créée par dix-sept nations signataires et dont l'action s'amplifiera jusqu'à aujourd'hui.

On peut tirer de cette aventure du mètre plusieurs enseignements. Le premier est de nature scientifique et technique en ce qu'il s'agissait au départ de rapporter le choix d'une unité à un « prototype invariable, pris dans la nature », pour reprendre les mots de Talleyrand. Ce choix n'est bien sûr en aucun cas unique, et la suite de l'histoire le prouvera en ne rapportant à partir de 1967 l'unité de longueur, ni directement au temps comme pour la seconde battue par un pendule, ni à l'espace terrestre comme avec une fraction de méridien ou l'artefact d'une barre de platine iridié, mais à une distance parcourue par la lumière dont la vitesse est fixée. L'autre enseignement est que l'adoption d'une unité se doit d'être universellement partagée « à tous les temps, à tous les peuples », dans l'esprit d'égalité et de fraternité de la Révolution française, ce qui nécessite un dépassement des individualismes au profit de la recherche d'un bien commun, pour le bénéfice de l'humanité tout entière.

Traversé par les vicissitudes de l'histoire, l'élan initial d'unification et d'universalisme, tel qu'il a été porté par les États-membres à la création du Bureau international des poids et mesures, s'est poursuivi avec détermination depuis 1875 et le programme de cette 27e conférence en atteste une fois de plus de façon claire, avec plusieurs projets de résolution et des perspectives pour les conférences futures. N'étant pas spécialiste de métrologie, j'ai appris à en mesurer l'importance et les enjeux grâce à l'aide précieuse du « Comité Science et métrologie » de notre Académie et de ses responsables Christian Bordé et Christophe Salomon, qu'il m'est particulièrement agréable de remercier.

Parmi les perspectives en ligne de mire, pour lesquelles cette conférence se proposera de poser des jalons en vue d'être débattues en 2026, pour une adoption souhaitée en 2030, figure la redéfinition de la seconde. Une feuille de route a été préparée en ce sens par le Comité consultatif du temps et des fréquences, dont je salue le travail.

Si cette question retient particulièrement mon intérêt et si je souhaite en dire plus spécifiquement quelques mots, c'est non seulement pour l'importance propre que le choix de cette dernière unité revêt, mais aussi pour l'écho que l'intitulé même de ce Comité, « Comité consultatif du temps et des fréquences », trouve dans mes propres recherches en accolant les termes de temps et de fréquence. L'analyse temps-fréquence a en effet toujours été au cœur de mes travaux de chercheur en traitement du signal et je lui ai consacré plusieurs ouvrages.

Au vu de la résolution prise en 2018 lors de la 26e réunion de la Conférence générale des poids et mesures, la seconde est désormais définie, je cite « en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu$Cs, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1} ».

Il est évidemment significatif qu'il faille finalement s'en rapporter à une référence de fréquence pour établir une unité de temps, ce qui bien sûr n'est pas pour surprendre lorsque l'on sait les

rapports et contraintes qu'entretiennent entre elles les notions de temps et de fréquence. Les mathématiciens diront que ce sont des variables canoniquement conjuguées, ce qui a été formalisé par les travaux de Joseph Fourier dont on fête cette année le 200e anniversaire de la publication de son traité sur la Théorie analytique de la chaleur. Les physiciens ajouteront, à la suite de Werner Heisenberg, que le couplage qui relie les descriptions d'une même grandeur en temps ou en fréquence fait que plus grande est la précision dans un domaine, plus faible est celle dans l'autre. Le tour de force mathématique de Fourier a été de montrer que toute forme d'onde, aussi complexe soit elle, peut se représenter comme une superposition d'ondes monochromatiques, c'est-à-dire de fréquences pures. La limitation physique de son approche est cependant que pour qu'une onde soit véritablement monochromatique, il lui faut s'accorder du principe d'incertitude d'Heisenberg et être éternelle.

Cette situation ouvre la voie à deux questions dont l'analyse du signal récente a pu montrer qu'elles étaient reliées et sont susceptibles de croiser des questions de métrologie : d'une part envisager la notion de fréquence d'une façon plus conforme à l'intuition physique en s'affranchissant de la contrainte d'éternité ; d'autre part s'intéresser à la stabilité d'une oscillation supposée périodique, sur une échelle de temps fixée. Quitter les ondes éternelles de Fourier revient en fait à mettre mathématiquement en action une intuition très simple : celle de la notation musicale qui fixe une durée à une note dont la hauteur porte néanmoins une information de fréquence. La variante de l'analyse de Fourier qui résulte de cette approche est ce qu'on appelle l'analyse en ondelettes. Outre qu'elle fournit une réponse intuitive au souci d'écrire en quelque sorte la partition d'un signal, sa définition repose sur une idée d'échelle de temps. On a alors pu montrer que ceci offre une possibilité de revisiter des outils de métrologie comme la variance d'Allan, largement utilisée pour quantifier la stabilité d'une horloge atomique. Sans doute est-ce un point anecdotique mais ceci m'aura permis de tangenter dans mes propres travaux des préoccupations propres à cette Conférence et de souligner l'intérêt d'approches pluridisciplinaires associant mathématiques, physique et algorithmie.

Pour en revenir à la Conférence qui nous réunit cette semaine, la richesse de son programme témoigne de la vitalité d'un domaine dont on ne soupçonne pas toujours à quel point il impacte notre vie quotidienne. Le souci d'unification qu'il porte constitue un très bel exemple de ce que la science peut permettre comme terreau privilégié de partages et de rapprochements à l'échelle mondiale. La science, en tant que porteuse d'universalisme, est partie prenante des relations qu'entretiennent les peuples entre eux, et les efforts collaboratifs qu'elle nécessite se doivent d'être non seulement partagés mais encore d'être portés par des partenaires qui ont une vision commune de respect mutuel et de liberté.

L'Académie des sciences se doit à ce point de rappeler que, pour elle ainsi que pour l'ensemble des Académies des sciences du G7, l'agression russe dont est victime l'Ukraine est une attaque contre les principes fondamentaux de liberté, de démocratie et d'autodétermination qui constituent la base de la liberté académique et des possibilités d'échanges et de coopération scientifiques.

Au nom de l'Académie des sciences, je vous souhaite à toutes et à tous une excellente 27e Conférence générale, faite d'interactions, de dialogues et d'échanges dont je ne doute pas qu'ils seront fructueux. »

M. Flandrin annonce qu'un certain nombre d'États Membres ont demandé à pouvoir faire des déclarations. Les délégués des États Membres ayant soumis ces requêtes sont invités à prendre la parole et font les déclarations suivantes[1].

[1] Déclarations données en anglais lors de la réunion de la CGPM. Traduction du BIPM.

États-Unis d'Amérique : « Comme l'a déclaré Antony Blinken, secrétaire d'État américain, les États-Unis et ses alliés et partenaires restent unis face à l'agression russe et continueront à soutenir l'Ukraine qui lutte pour son avenir. »

Royaume-Uni : « Le gouvernement du Royaume-Uni et ses alliés restent unis face à l'agression russe et continueront à soutenir l'Ukraine qui lutte pour son avenir. »

Australie : « L'Australie condamne avec la plus grande fermeté l'invasion injustifiée, injuste et illégale de l'Ukraine par la Russie, qui constitue une violation flagrante du droit international, y compris de la Charte des Nations Unies. »

Canada : « Le Canada et ses alliés et partenaires restent unis face à l'agression russe et continueront à soutenir l'Ukraine qui lutte pour son avenir. »

Estonie : « L'Estonie condamne avec la plus grande fermeté l'agression injustifiable de la Russie envers l'Ukraine, menée au mépris évident du droit international et menaçant la stabilité et la sécurité internationales. La guerre de la Russie a détruit une partie de l'infrastructure de la qualité en Ukraine. Nos collègues d'Ukraine ont vu leurs maisons détruites et s'inquiètent pour leurs familles. Nous avons l'obligation morale de soutenir l'Ukraine par tous les moyens. »

Pologne : « La délégation polonaise soutient totalement l'intervention précédemment faite par l'Estonie et la Pologne soutient également l'Ukraine. »

M. Flandrin remercie les délégués pour leur déclaration et retourne à l'ordre du jour.

6. Nomination du secrétaire de la CGPM

Le président de la CGPM propose que M. Usuda, secrétaire du CIPM, soit nommé secrétaire de la CGPM. M. Usuda est élu secrétaire de la CGPM par consensus.

7. Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter en personne et en ligne

M. Usuda souhaite la bienvenue aux délégués des États Membres et des États et Entités économiques Associés participant en personne ou en ligne à la 27e réunion de la CGPM. Il précise que la pratique établie, qui est de procéder à l'établissement de la liste des délégués chargés du vote au nom de leur Gouvernement, en demandant à chaque chef de délégation de confirmer la présence de sa délégation, a été modifiée en raison des circonstances spéciales dans lesquelles se tient la 27e réunion de la CGPM et de son format hybride. Ainsi, le secrétaire lit à haute voix la liste des États Membres en indiquant pour chacun s'il participe en personne, en ligne, ou s'il est absent.

État Membre	**Participation**
Afrique du Sud	en personne
Allemagne	en personne
Arabie saoudite	en personne

Argentine	en personne
Australie	en personne
Autriche	en personne
Bélarus	en personne
Belgique	en ligne
Brésil	en personne
Bulgarie	absente
Canada	en personne
Chili	absent
Chine	en personne
Colombie	en ligne
Costa Rica	en personne
Croatie	en personne
Danemark	absent
Égypte	en personne
Émirats arabes unis	en personne
Équateur	absent
Espagne	en personne
Estonie	en personne
États-Unis d'Amérique	en personne
Fédération de Russie	en personne
Finlande	en personne
France	en personne
Grèce	en personne
Hongrie	en ligne
Inde	en personne
Indonésie	en personne
Irak	en ligne
Irlande	en personne
Israël	en personne
Italie	en personne
Japon	en personne
Kazakhstan	en personne
Kenya	en personne

Lituanie	en personne
Malaisie	en ligne
Mexique	en personne
Monténégro	en personne
Maroc	en personne
Nouvelle-Zélande	en personne
Norvège	en personne
Pakistan	absent
Pays-Bas	en personne
Pologne	en personne
Portugal	en personne
République de Corée	en personne
République islamique d'Iran	en ligne
Roumanie	en ligne
Royaume-Uni de Grande Bretagne et d'Irlande du Nord	en personne
Serbie	absente
Singapour	en personne
Slovaquie	en personne
Slovénie	en personne
Suède	en personne
Suisse	en personne
Tchéquie	en personne
Thaïlande	en personne
Tunisie	en personne
Türkiye	en personne
Ukraine	en ligne
Uruguay	en ligne

Sur les 64 États Membres, 58 sont représentés. La majorité absolue requise pour le vote des résolutions est donc de 30. Sur les 58 États Membres dont les délégués ont présenté des titres d'accréditation, 49 étaient représentés en personne et neuf en ligne.

8. Approbation de l'ordre du jour

Le président de la CGPM demande si les délégués ont des commentaires au sujet de l'ordre du jour. En l'absence de commentaire, l'ordre du jour est adopté.

9. Approbation de la procédure spéciale

Le secrétaire de la CGPM se réfère au « *Document de travail de la CGPM, Octobre 2022* » qui comprend le projet de texte de la Procédure spéciale régissant la conduite de la réunion. L'objet de la Procédure spéciale est que la 27e réunion de la CGPM puisse se tenir dans un format hybride, permettant à la fois une participation en personne et à distance des représentants des États Membres, ainsi que des représentants des États et Entités économiques Associés à la CGPM et des observateurs invités. Le secrétaire souligne que cette Procédure spéciale est exceptionnelle et qu'elle n'amende en aucun cas les dispositions de la Convention du Mètre et de son Règlement annexé. D'autres organisations internationales siégeant en France ont eu recours à une procédure similaire permettant à leurs organes de gouvernance et assemblées générales de remplir leurs fonctions en dépit des restrictions de voyage.

Le texte initial de la Procédure spéciale a été envoyé aux États Membres le 11 février 2022, en même temps que la Convocation à la 27e réunion de la CGPM. Les États Membres ont été invités à confirmer au secrétaire du CIPM pour le 30 juin 2022 au plus tard s'ils soutenaient l'adoption de la Procédure spéciale. La majorité des États Membres ont confirmé leur approbation mais deux États Membres ont indiqué qu'ils ne soutiendraient pas la proposition de vote en ligne. Une version révisée de la Procédure spéciale a ensuite été rédigée afin de supprimer la possibilité de voter en ligne concernant l'élection du CIPM et l'élection de la Commission pour l'élection du CIPM. La section V, disposition 17, de la Procédure spéciale révisée prévoit ainsi : « *En vertu de l'article 7 du Règlement annexé, la CGPM conduit les élections au scrutin secret. Un vote au scrutin secret sur site au Palais des Congrès sera organisé avec l'assistance d'un service tiers de vote pour l'élection des membres du CIPM et celle de la Commission pour l'élection du CIPM. Tout sera mis en œuvre pour s'assurer que ces élections se déroulent en personne et de façon rapide, à l'aide d'outils de vote fiables et sécurisés, tel que requis*. » Cette version a été publiée le 22 juillet 2022 ; elle a ensuite été présentée aux représentants des États Membres lors d'une réunion préparatoire en ligne le 6 septembre 2022 et lors d'une réunion préparatoire hybride le 14 novembre 2022.

Le président de la CGPM procède à un vote à main levée afin d'adopter la Procédure spéciale. Cette dernière est adoptée à l'unanimité.

10. Rapport du président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 26e réunion de la CGPM

M. Louw, président du CIPM, présente le rapport suivant.

« En vertu de la Convention du Mètre, j'ai le plaisir de vous présenter mon rapport sur les travaux accomplis depuis la 26e réunion de la CGPM qui s'est tenue en 2018.

Lors de sa première réunion en mars 2019, le CIPM nouvellement élu était conscient que l'objectif majeur des deux dernières décennies, à savoir la révision du Système international d'unités (SI), avait été atteint et il a ainsi décidé de se concentrer sur l'élaboration d'une nouvelle stratégie pour le BIPM à compter de 2030.

Le développement de cette stratégie se focalise sur les principaux défis scientifiques à relever (en premier lieu, la mise en œuvre du SI révisé), sur la prise en considération de l'évolution des besoins de la métrologie, sur le renforcement de la coopération avec d'autres organisations internationales concernant les sujets liés à la science de la mesure, sur la révision de la stratégie concernant les futurs États Membres et Associés, et sur la modernisation du fonctionnement de l'organisation.

Malgré les défis posés par la pandémie de Covid-19, le CIPM a poursuivi son travail : un rapport sur l'élaboration de la stratégie a été publié, des rapports sur l'avancement des progrès ont été donnés lors des réunions des représentants des gouvernements et des directeurs des laboratoires nationaux de métrologie qui se sont tenues les 17 et 18 octobre 2019 (au siège du BIPM), puis en octobre 2020 et 2021 (en ligne).

Mon intention n'est donc pas de décrire en détail les travaux accomplis mais de mettre en lumière les principales actions et réalisations.

10.1 États Membres et Associés

Je souhaite commencer mon rapport en souhaitant la bienvenue aux nouveaux États Membres et aux nouveaux Associés à la CGPM. Depuis la 26e réunion de la CGPM, cinq États ont accédé à la Convention du Mètre (parmi lesquels quatre étaient précédemment Associés à la CGPM) et un État est devenu Associé. Un autre État est de nouveau devenu Associé après une brève absence.

On compte actuellement 64 États Parties à la Convention du Mètre et 36 Associés à la CGPM (33 États Associés et trois Entités économiques Associées).

Malheureusement, deux Associés ont été exclus en raison de leur persistance à ne pas régler leurs souscriptions et un Associé a demandé à cesser d'être Associé pour des raisons économiques. Nous espérons que ces États pourront de nouveau participer dans le futur. Les changements concernant les États Membres et Associés depuis la 26e réunion de la CGPM ont été les suivants.

Nouvel État Membre (et date d'accession) :

- Maroc (24 mai 2019)

États précédemment Associés qui sont devenus Membres (et date d'accession) :

- Équateur (6 août 2019)
- Bélarus (13 janvier 2020)
- Estonie (19 janvier 2021)
- Costa Rica (5 septembre 2022)

Nouvel Associé à la CGPM (et date d'association) :

- Cambodge (1er janvier 2021)

État redevenu Associé à la CGPM (et date d'association) :

- Zimbabwe (8 février 2022)

Associés à la CGPM exclus (et date d'exclusion) :

- Cuba (1er janvier 2022)
- Soudan (1er janvier 2022)

État ayant requis de cesser d'être Associé à la CGPM (et date de retrait) :

– Seychelles (1er janvier 2022)

États Associés encouragés à accéder à la Convention du Mètre

Conformément à la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 24e réunion (2011), sept Associés ont rempli les critères fixés et ont par conséquent été encouragés à accéder à la Convention du Mètre. Pour six d'entre eux, leur souscription a déjà été soumise au mécanisme d'augmentation progressive. Tel sera le cas pour le septième en 2023. Il est rappelé que lorsqu'un Associé a été officiellement encouragé à devenir État Membre mais qu'il n'accède pas à la Convention du Mètre, sa souscription est augmentée tous les ans progressivement pendant une période de 5 ans jusqu'à atteindre un montant équivalent à 90 % de la contribution annuelle que cet État acquitterait s'il était État Membre. Dans l'ensemble, cette approche a bien fonctionné et un certain nombre d'accessions sont à attribuer à ce mécanisme.

Suite à la mise en œuvre des décisions CIPM/106-20, CIPM/106-21 et CIPM/106-22 (2017), la situation actuelle concernant les États Associés encouragés à accéder à la Convention du Mètre et soumis à une augmentation de leur souscription est la suivante[2] :

État Associé	**Date à laquelle les critères ont été remplis**	**Période d'augmentation de la souscription**	
		Début	**90 % de la contribution annuelle**
Lettonie	2011	2013	2017
Panama	2011	2013	2017
Viet Nam	2011	2013	2017
Pérou	2014	2016	2020
Philippines	2014	2016	2020
Azerbaïdjan	2020	2022	2026
Luxembourg	2021	2023	2027

10.2 CIPM

Conformément à la Résolution 2 adoptée par la CGPM à sa 25e réunion (2014), une élection a été organisée afin de pourvoir les 18 sièges du CIPM. Les membres élus se sont par conséquent réunis après la réunion de la CGPM et ont élu le bureau du CIPM (président, secrétaire et deux vice-présidents).

[2] Conformément à la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 24e réunion (2011), l'augmentation progressive et irréversible du montant de la souscription sera applicable au 1er janvier de la deuxième année suivant la décision du CIPM d'encourager l'Associé à adhérer à la Convention du Mètre.

Les membres actuels du CIPM[3] sont les suivants :

	Élection initiale	Dernière élection
Président		
W. Louw (Afrique du Sud)	15 mai 2013	2018
Secrétaire		
T. Usuda (Japon)	1er juillet 2012	2018
Vice-présidents		
J.K. Olthoff (États-Unis)	16 novembre 2018	2018
J. Ullrich (Allemagne)	15 mai 2013	2018
Autres membres du CIPM		
F.V. Bulygin (Fédération de Russie)	20 novembre 2014	2018
I. Castelazo (Mexique)	20 novembre 2014	2018
D. del Campo Maldonado (Espagne)	16 novembre 2018	2018
N. Dimarcq (France)	16 novembre 2018	2018
Y. Duan (République populaire de Chine)	8 mars 2010	2018
H. Laiz (Argentine)	7 décembre 2016	2018
T. Liew (Singapour)	20 novembre 2014	2018
P. Neyezhmakov (Ukraine)	16 novembre 2018	2018
S.R. Park (République de Corée)	16 novembre 2018	2018
M.L. Rastello (Italie)	7 décembre 2016	2018
P. Richard (Suisse)	20 novembre 2014	2018
G. Rietveld (Pays-Bas)	20 novembre 2014	2018
M. Sené (Royaume-Uni)	7 décembre 2016	2018
A. Steele (Canada)	16 novembre 2018	2018

Réunions du CIPM

Le CIPM s'est réuni sept fois depuis la 26e réunion de la CGPM :

- 111e réunion – juin 2022 (format hybride)
- 111e réunion – réunion préparatoire en mars 2022 (en ligne)
- 110e réunion – seconde partie – octobre 2021 (en ligne)
- 110e réunion – première partie – juin 2021 (en ligne)

[3] Au 15 novembre 2022.

- 109e réunion – octobre 2020 (en ligne)
- 108e réunion – seconde partie – octobre 2019 (en personne)
- 108e réunion – première partie – mars 2019 (en personne)

Il est intéressant de noter que la dernière fois où le CIPM a pu se réunir en personne était en 2019. De 2020 à 2022, le CIPM a tenu ses réunions en ligne ou dans un format hybride en raison des restrictions imposées pour lutter contre la pandémie de Covid-19. Le CIPM a néanmoins été en mesure de faire progresser ses activités et je tiens à remercier les membres du CIPM pour leur adaptabilité au cours de cette période difficile.

Présidents des Comités Consultatifs

Le CIPM a nommé ou reconduit les présidents des Comités consultatifs pour un mandat de quatre ans lors de la première partie de la 108e session du CIPM en mars 2019. Les présidents actuels sont les suivants :

- Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV) : H. Laiz
- Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM) : G. Rietveld
- Comité consultatif des longueurs (CCL) : I.A. Castelazo
- Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM) : P. Richard
- Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) : M.L. Rastello.
- Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie (CCQM) : S.-R. Park
- Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI) : M. Sené
- Comité consultatif de thermométrie (CCT) : Y. Duan.
- Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) : N. Dimarcq
- Comité consultatif des unités (CCU) : J. Ullrich

Titre de membre honoraire

En octobre 2019, le CIPM a décidé d'accorder le titre de membre honoraire à M. Barry Inglis en reconnaissance du travail qu'il a accompli en tant que président du CIPM et qui a eu un impact sur l'organisation dans son ensemble (Décision CIPM/108 37). M. Inglis a été président du CIPM pendant huit ans, de 2010 à 2018, période au cours de laquelle il a participé à trois réunions de la CGPM. Il a en outre conduit le CIPM tout au long de l'examen de sa gouvernance puis de la mise en place de la réforme de ses procédures. Ses efforts de coordination du travail du CIPM avec ses Comités consultatifs et la communauté des laboratoires nationaux de métrologie ont mené à l'adoption des définitions révisées des unités du SI en 2018.

En mémoire de William R. Blevin

C'est avec une profonde tristesse que je vous fais part du décès de notre ancien collègue du CIPM et membre honoraire du CIPM, William R. Blevin, le 11 août 2022 à l'âge de 92 ans. W. Blevin a joué un rôle clé dans toutes les activités visant à préparer la redéfinition de la candela, adoptée par la CGPM en 1979, et il a été co-auteur de la publication du BIPM « Principes régissant la photométrie ». Il a été membre du CIPM pendant dix-huit années et a été président du CCPR de 1982 à 1984, vice-président du CIPM de 1992 à 1997, puis secrétaire du CIPM de 1997 à 2000. Il a été l'auteur principal de ce que l'on appelle le « Rapport Blevin », soumis par le CIPM lors de la 21e réunion de la CGPM en 1999, intitulé « Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie : les collaborations internationales et le rôle du BIPM ».

10.3 Actions résultant des Résolutions adoptées par la CGPM à sa 26e réunion (2018)

Résolution 1 - Sur la révision du Système international d'unités (SI)

La révision du SI adoptée par la CGPM à sa 26e réunion est entrée en vigueur le 20 mai 2019 (Journée mondiale de la métrologie). Je suis heureux de pouvoir annoncer que la mise en œuvre s'est très bien passée et qu'elle a été bien acceptée dans le monde entier. Nous disposons désormais d'un ensemble d'unités qui ne sont plus liées à des artefacts ; la communauté de la recherche métrologique explore déjà de nouvelles façons d'exploiter cette nouvelle liberté, par exemple en cherchant à réaliser l'unité de masse à un niveau bien inférieur à 1 kg, l'objectif étant de réduire l'incertitude de mesure à l'échelle micrométrique ou nanométrique. Il reste une dispersion mineure au plus haut niveau des réalisations du kilogramme. Cela ne cause aucun problème pratique mais nous espérons que le travail scientifique permettra de parvenir à une convergence au cours des années à venir.

Résolution 2 - Sur la définition des échelles de temps

La Résolution 2 recommandait à toutes les organisations et unions concernées de parvenir à une compréhension commune des échelles de temps de référence, afin de répondre aux besoins des communautés d'utilisateurs actuelles et à venir, et de travailler ensemble afin d'améliorer davantage l'exactitude de la prédiction d'UT1 – UTC et ses méthodes de dissémination et de répondre aux futures exigences des utilisateurs.

Ces dernières années, le CCTF s'est concentré sur les activités de préparation de la future redéfinition du Temps universel coordonné (UTC), l'échelle de temps maintenue par le BIPM. Plusieurs décisions ont été prises, comme celle d'établir un groupe spécifique du CIPM afin d'aider à préparer les éléments nécessaires en vue de la Conférence mondiale des radiocommunications de 2023 (Décision CIPM/108-40 (2019)).

Je souhaite souligner qu'il est important de conserver une certaine dynamique en la matière et j'invite les États Membres à apporter leur soutien afin de garantir que l'interopérabilité des systèmes multi-GNSS reposera sur le Temps universel coordonné, ce qui permettra d'éviter la prolifération d'échelles de temps de référence internationales.

Le Projet de résolution D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC » et le Projet de résolution E « Sur la future redéfinition de la seconde » seront présentés au cours de la Conférence.

Résolution 3 - Sur les objectifs du BIPM

Nous pouvons rendre compte des principaux objectifs mentionnés dans la Résolution 3. Les groupes de réflexion 3 et 4 du Sous-comité du CIPM sur la stratégie se sont concentrés sur deux éléments afin de pouvoir apporter des réponses à la Résolution 3 :

a) prendre des mesures en réponse à plusieurs résolutions de la CGPM qui encouragent le CIPM à faire en sorte d'augmenter le nombre de Membres, tout en réfléchissant au fait que la majorité, si ce n'est la totalité, des potentiels nouveaux États Membres seront bien en dessous du niveau minimum de contribution :

- tenir compte de la Résolution 5 (2011) concernant l'implication des organisations intergouvernementales,
- préparer un résumé de la situation actuelle concernant l'engagement des États aux activités de la Convention du Mètre,
- explorer d'autres mécanismes permettant de faciliter une participation universelle en vue de futures discussions,

b) renforcer les liens établis avec et entre les organisations régionales de métrologie, notamment en relevant le défi que posent les laboratoires nationaux de métrologie qui ne participent à aucune organisation régionale de métrologie.

Représenter la communauté métrologique internationale

Afin de relever avec efficacité les défis scientifiques et sociétaux actuels et à venir, le BIPM en tant qu'organisation créée par les États Parties à la Convention du Mètre doit constamment évoluer pour améliorer ses pratiques de gouvernance et rester moderne. Concernant la participation à l'organisation, le modèle actuel a attiré un peu plus de 100 nations du monde entier qui participent officiellement aux activités coordonnées du système de mesure mondial. Bien que ces nations représentent près de 98 % du PIB mondial, 83 États membres des Nations Unies et d'autres entités économiques restent à intégrer au système de mesure mondial officiel pour le rendre totalement international.

Le CIPM propose le Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre » afin d'obtenir un mandat pour trouver une solution faisant consensus qui pourrait être présentée à la CGPM lors de sa 28e réunion.

Être un centre de collaboration scientifique et technique et de comparaisons de mesure

Dans un monde où l'infrastructure de la qualité devient de plus en plus importante comme approche intégrée permettant d'assurer l'interopérabilité, la sécurité alimentaire, la protection de l'environnement, l'efficacité des soins de santé et le respect des lois, la coopération avec d'autres organisations internationales est essentielle pour que le BIPM puisse relever des défis.

Décision CIPM/109-15 (2020)

Le CIPM approuve les termes de référence d'un Groupe opérationnel conjoint entre le BIPM (représentant les États Parties à la Convention du Mètre) et l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML) dans le but de favoriser une coopération renforcée entre le BIPM et l'OIML avec pour objectifs :

- *de faciliter les activités des deux organisations en servant au mieux leurs États Membres,*
- *de rendre les deux organisations plus attractives pour les États qui ne participent pas encore aux activités de l'une ou des deux organisations.*

MM. Louw, Milton et Richard sont nommés représentants du BIPM au sein du Groupe opérationnel conjoint. D'autres membres du CIPM seront invités à rejoindre le Groupe opérationnel conjoint selon les besoins.

Activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances (CBKT)

1. Le renforcement des capacités a pour objectif de parvenir à un équilibre global des aptitudes métrologiques des États Membres. Chacune des initiatives de renforcement des capacités est mise en place pour répondre aux besoins des laboratoires nationaux de métrologie. Il est déjà possible de constater que les activités de renforcement des capacités concernant le CIPM MRA donnent des résultats visibles et positifs. De nouveaux laboratoires nationaux de métrologie ont pour la première fois assumé le rôle de pilote de comparaisons ou, dans certains cas, partagent ce rôle avec un laboratoire national plus expérimenté. De la même façon, une nouvelle génération de présidents des comités techniques des organisations régionales de métrologie commence à émerger. Les laboratoires nationaux de métrologie des Associés à la CGPM qui ont signé le CIPM MRA mais qui n'étaient pas en mesure de progresser quant au développement d'aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs), ont pu revoir avec succès les procédures d'examen des CMCs et publier leurs premières CMCs dans la base de données sur les comparaisons clés (KCDB).

2. Le transfert de connaissances permet de garantir que le travail du BIPM a le plus grand impact possible. Le programme de transfert des connaissances est très bien accueilli : c'est devenu un pilier du soutien apporté aux laboratoires nationaux de métrologie afin de renforcer leurs aptitudes de laboratoire.

Résolution 4 - Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2020 à 2023

Le CIPM a supervisé le budget et la performance financière du BIPM : les états financiers du BIPM ont été certifiés sans réserve majeure par l'auditeur de 2018 à 2021. Le BIPM est resté dans les limites du budget approuvé et des mesures supplémentaires ont été prises afin de faire face aux défis financiers à venir, concernant en particulier la Caisse de retraite et de prévoyance du BIPM. Cela traduit, dans une large mesure, la compétence et le travail soutenu du directeur du BIPM et de son personnel.

Résolution 5 - Sur les contributions arriérées des États Membres et la procédure d'exclusion

Il a été décidé dans la Résolution 5 (2018) ce qui suit :

- le CIPM appliquera l'article 6 alinéa 8 du Règlement annexé,
- le CIPM traitera des cas où la pratique historique a conduit à l'accumulation d'arriérés.

À la suite de cette résolution, la politique concernant l'accumulation sur le long terme d'arriérés a été révisée puis elle a été mise en œuvre par les décisions prises par le CIPM en 2019, 2020 et 2021 ; ces décisions seront présentées dans le rapport du président du Sous-comité du CIPM sur les finances.

Pour l'essentiel, le CIPM a traité en 2019 la question de l'accumulation d'arriérés. En 2020, le CIPM a accepté le calendrier proposé par le président du Sous-Comité du CIPM sur les finances afin de mettre en œuvre la Résolution 5 adoptée par la CGPM à sa 26e réunion (2018) et a demandé au Sous-Comité de continuer à coordonner les actions que le CIPM doit mettre en place afin que les États Membres concernés par la question des avances parviennent à un consensus sur ce sujet. En 2021, le CIPM a confirmé, en se fondant sur l'examen effectué par le Sous-comité du CIPM sur les finances, que les données préparées par le personnel du BIPM concernant les arriérés accumulés et les avances associées étaient complètes et satisfaisantes. Le BIPM a ensuite informé les États qui avaient été précédemment notifiés de l'accumulation d'arriérés au-delà de six années de défaut de paiement de leur situation financière.

Du fait de ces décisions, il a été nécessaire d'apporter une correction aux états financiers du BIPM puis la question a pu être considérée comme close.

Je tiens à remercier le Sous-comité du CIPM sur les finances, en particulier Philippe Richard et le personnel du BIPM pour le temps considérable qu'ils ont passé à examiner de façon méticuleuse les dossiers, en remontant jusqu'il y a cinquante ans, afin de s'assurer que le CIPM prenne les mesures appropriées pour répondre à la Résolution 5.

Les progrès réalisés concernant les Résolutions 1, 2 et 3 sont décrits plus en détail dans la stratégie du CIPM, le projet de programme de travail du BIPM et les projets de résolution de la 27e réunion de la CGPM.

10.4 Rapport sur les actions entreprises par le CIPM concernant la stratégie du CIPM à compter de 2030

Lors de sa réunion en juin 2019, le Sous-comité du CIPM sur la stratégie a discuté en profondeur du changement majeur qu'a constitué la révision du SI en 2018. Les parties prenantes, et en particulier les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés, se sont attachés à mettre au point des

réalisations des unités définies à partir de constantes. À la suite de cette discussion, le Sous-comité sur la stratégie a commencé à élaborer une stratégie pour le long terme. Les sujets évoqués sont les suivants :

- Quelles sont les questions que la métrologie scientifique devra traiter d'ici 2030 et après 2030 ?
- Quelles sont les technologies disruptives qui façonneront notre futur ?
- À quoi ressemblera l'organisation en 2050 et comment se sera-t-elle adaptée aux évolutions qui auront eu lieu d'ici là ?

Le CIPM a discuté de la stratégie dans son ensemble, en évoquant la Convention du Mètre en 2030 et après 2030, et de la façon d'identifier et de rendre compte des exigences de la métrologie sur le long terme. Les membres du sous-comité ont observé que le rôle de la Convention du Mètre et des organes qu'elle a établis est unique et on ne saurait sous-estimer sa contribution à l'harmonisation mondiale des mesures. Parmi les autres points qui ont été abordés figure la question de savoir si le BIPM/CIPM bénéficie aussi efficacement qu'il le devrait à toutes les économies et à tous les laboratoires nationaux de métrologie. Le sous-comité a également examiné si le BIPM entretient des relations aussi efficaces que possible avec d'autres organisations intergouvernementales.

À la suite de cette réunion, le CIPM a décidé d'étendre les termes de référence du Sous-comité du CIPM sur la stratégie afin d'inclure la mission de conseiller le CIPM sur des orientations métrologiques stratégiques plus larges selon les cinq sujets stratégiques ci-dessous :

1. répondre à l'évolution des besoins de la métrologie,
2. relever les principaux défis scientifiques afin de faire progresser le système mondial de mesure,
3. établir une stratégie pour renforcer les relations avec d'autres organisations internationales concernant les questions métrologiques,
4. réviser la stratégie concernant les futurs États Membres et Associés,
5. moderniser le fonctionnement de l'organisation.

Les points 1 à 3 concernent directement la Résolution 1 (2018) de la CGPM.

Cinq groupes de réflexion ont été mis en place afin de travailler sur ces thématiques et afin de rédiger des rapports qui pourront servir à développer la stratégie du CIPM à compter de 2030. De plus amples détails sur les résultats de ce travail sont présentés dans le document « *Report on the actions taken by the CIPM towards a "CIPM Strategy 2030+"* ».

Le groupe de réflexion 1 a identifié trois éléments qui influeront toute future prise de décision à l'échelle mondiale, qu'il s'agisse de sujets technologiques ou sociétaux :

- le bien-être : assurer la sécurité sanitaire d'une population de plus en plus nombreuse dont les attitudes et valeurs sociales ne cessent d'évoluer ;
- la durabilité : réduire l'impact humain sur le climat et gérer les ressources naturelles ;
- l'esprit d'entreprise : garantir l'innovation numérique afin d'accroître la prospérité, la productivité et la croissance et afin d'assurer l'égalité et l'équité.

Alors que certains aspects de la stratégie sont déjà mis en œuvre, l'objectif global est de parvenir à donner une vision claire de ce que pourrait être le futur lors du 150e anniversaire de la signature de la Convention du Mètre en mai 2025, puis de proposer des mesures appropriées pour la 28e réunion de la CGPM (2026).

1. Répondre à l'évolution des besoins de la métrologie.

Cinq domaines principaux marqués par l'évolution des besoins de la métrologie ont été identifiés ; il est à noter que ces domaines sont considérés comme des « grands défis » et ne se limitent pas au champ de la métrologie :

- le changement climatique et l'environnement,
- la santé et les sciences de la vie,
- la sécurité alimentaire,
- l'énergie,
- la fabrication de pointe.

Deux thèmes transversaux horizontaux supplémentaires ont été identifiés :

- la transformation numérique,
- la « nouvelle » métrologie.

Pour chacun de ces domaines et thèmes, des actions sont proposées afin de promouvoir et renforcer la coopération internationale. Ces sujets font l'objet du Projet de résolution A « Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie ».

La structure actuelle du CIPM, en particulier ses Comités consultatifs, est organisée selon un schéma métrologique vertical (axé par exemple sur la mesure de grandeurs/unités spécifiques ou sur les définitions d'unité). Les défis précédemment identifiés requerront une approche multidisciplinaire afin de les traiter de façon holistique. Ainsi, le CIPM propose de créer des forums appropriés qui permettront de façonner et coordonner la manière dont la communauté de la métrologie peut répondre à ces grands défis, l'objectif étant de coordonner de nouvelles possibilités afin que la métrologie ait un impact sur les défis mondiaux transversaux.

Je souhaiterais revenir sur les deux thèmes transversaux horizontaux.

Transformation numérique

Le monde est au cœur d'une révolution numérique qui remet en question les pratiques de travail et les paradigmes de la communauté métrologique en matière de traçabilité et de reproductibilité. Les défis qui se présentent sont à la fois d'amener la métrologie dans le monde numérique et d'adapter la métrologie au monde numérique, afin que la communauté de la métrologie puisse garantir la cohérence des mesures et la confiance vis-à-vis des résultats de mesure dans ce nouveau monde. Il est nécessaire de mettre en place une infrastructure normalisée et acceptée au niveau international concernant la provenance des données, des certificats d'étalonnage numériques, des ontologies acceptées pour les informations et données lisibles et exploitables par machine, et la validation des techniques d'intelligence artificielle telles que l'apprentissage automatique. Tous ces éléments seront le fruit d'une collaboration interdisciplinaire et intersectorielle et devront être intégrés dans des normes internationales et résulté d'une collaboration interdisciplinaire et intersectorielle.

Le CIPM est à l'avant-garde des efforts mondiaux visant à coordonner la transformation numérique dans le domaine de la métrologie. Il a créé un Groupe spécifique sur le SI numérique afin de décider de la meilleure façon de fournir au monde un SI accessible aux machines.

De nombreuses activités ont déjà eu lieu dans le cadre de cette transformation rapide et passionnante ; ainsi, le Groupe spécifique sur le SI numérique a organisé un atelier virtuel intitulé « *The International System of Units in FAIR digital data* » qui a réuni plus de700 participants du monde entier intéressés par l'initiative du CIPM visant à établir un cadre numérique pour le SI.

Nouvelle métrologie

La traçabilité métrologique est l'un des principes clés de la métrologie : elle se définit comme « la propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure ». Le principe de la traçabilité métrologique s'est révélé extrêmement influent.

Toutefois, si l'on se tourne vers l'avenir, plusieurs avancées technologiques pourraient avoir des répercussions profondes et rapides sur la façon d'établir la traçabilité métrologique dans le futur : il s'agit notamment de l'utilisation de réseaux de capteurs, de l'instrumentation distribuée, des étalons de mesure intrinsèques, des progrès métrologiques rendus possibles par la révision du SI, et des implications de l'intelligence artificielle et du Big Data.

Ces deux défis transversaux se recoupent clairement et sont en lien avec les cinq premiers grands défis. Le CIPM a déjà commencé à s'attaquer au défi de la transformation numérique par l'intermédiaire de son Groupe spécifique sur le SI numérique ; plusieurs décisions ont ainsi été prises et ont conduit à la rédaction de la Déclaration commune d'intention sur la transformation numérique. Cette déclaration commune a été co-signée par huit organisations internationales. Plus de détails sur la déclaration commune sont données à un point ultérieur du présent rapport.

2. Relever les principaux défis scientifiques afin de faire progresser le système mondial de mesure

Les principaux défis scientifiques à relever pour faire progresser le système mondial de mesure ont été identifiés et s'articulent autour des actions actuelles et à venir nécessaires pour mieux réaliser le SI. Deux projets pourraient être décrits comme les principaux défis scientifiques concernant le SI :

- la redéfinition de la seconde, qui fait l'objet du Projet de résolution E,
- la redéfinition de la candela, dont la définition actuelle répond aux besoins actuels mais qui demeure un défi pour le futur.

Parallèlement aux défis scientifiques, nous pouvons constater les progrès réalisés qui conduisent à la nécessité d'étendre la liste des préfixes du SI, ce qui fait l'objet du Projet de résolution C « Sur l'extension de la liste des préfixes du SI ».

3. Établir une stratégie pour renforcer la coopération avec d'autres organisations internationales sur les sujets métrologiques

Le CIPM a conclu que la stratégie de collaboration avec d'autres organisations internationales est mature et que la supervision du CIPM assure une bonne gouvernance.

- Le Département des relations internationales et de la communication du BIPM a été renforcé afin de maintenir les relations et les interactions.
- Des membres du CIPM ont été nommés pour chaque collaboration stratégique afin d'aider le personnel du BIPM concernant les relations stratégiques ; des accords de collaboration sont mis en œuvre.

Depuis 2018, le CIPM et le personnel du BIPM continuent d'interagir avec d'autres organisations internationales pour lesquelles la métrologie compte. Le BIPM a formalisé certains liens existants par des accords, arrangements, protocoles d'accord avec les organisations suivantes :

- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
- Union internationale des télécommunications (UIT)
- Commission préparatoire de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE)
- Committee on Data of the International Science Council (CODATA)
- International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC)

Déclaration commune d'intention sur la transformation numérique au sein de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité

En 2022, la Déclaration commune d'intention sur la transformation numérique au sein de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité a été signée par le BIPM et les organisations suivantes :

- Committee on Data of the International Science Council (CODATA)
- Commission internationale de l'éclairage (CIE)
- International Electrotechnical Commission (IEC)
- International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)
- International Measurement Confederation (IMEKO)
- Organisation internationale de métrologie légale (OIML)
- Organisation internationale de normalisation (ISO)
- International Science Council (ISC)

La déclaration commune est le fruit d'un projet continu lancé par le CIPM et son Groupe spécifique sur le SI numérique visant à développer et mettre en place un format d'échange de données sécurisé et uniforme au niveau international qui sera fondé sur le Système international d'unités (SI). Elle permet de regrouper les organisations signataires qui souhaitent indiquer leur volonté de soutenir, d'une manière qui leur est propre, le développement, la mise en place et la promotion d'un cadre numérique du SI au sein d'une transformation numérique plus large de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité.

OIML

Le Groupe conjoint entre le BIPM et l'OIML a été établi avec pour objectif de parler d'une seule voix au nom de la métrologie et de favoriser une coopération renforcée. Le Groupe conjoint, composé du président du CIPM, du directeur du BIPM, du président du CIML et du directeur du BIML, s'est réuni plusieurs fois. Les deux organisations collaborent sur de nombreuses activités :

- la Journée mondiale de la métrologie, y compris la nouvelle initiative visant à ce que cette journée soit reconnue par l'UNESCO,
- l'élaboration en commun de documents, tels que le document « Systèmes de métrologie nationaux – Développement du cadre institutionnel et législatif »,
- les activités de collaboration internationale,
- la représentation,
- les questions institutionnelles et de fonctionnement,
- le renforcement des capacités.

UNESCO

Le Conseil exécutif de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) a fait un pas décisif vers la proclamation d'une Journée mondiale de la métrologie lors de sa session du 13 octobre 2022, à la suite de la proposition présentée par le Kazakhstan et soutenue par le BIPM et l'OIML. La décision devra être ratifiée lors de la 42e session de la Conférence générale de l'UNESCO qui se tiendra en novembre 2023. Si tout se passe comme prévu, l'UNESCO proclamera le 20 mai de chaque année comme journée mondiale de l'UNESCO : cette journée pourra ensuite être célébrée chaque année à partir de 2024.

Cette reconnaissance de la Journée mondiale de la métrologie par l'UNESCO offrira au BIPM et à l'OIML de nouvelles possibilités de promotion de la Journée mondiale de la métrologie. Cette initiative bénéficie déjà du soutien d'un certain nombre d'États Membres de l'UNESCO qui ne participent actuellement ni aux activités du BIPM ni à celles d'organisations régionales de métrologie, ce qui

encourage le BIPM à explorer des options de participation pour ces pays, dans le cadre de sa mission vers une adhésion universelle proposée dans le Projet de résolution F. Cette proclamation offrira également la possibilité au BIPM de demander qu'une partie des événements liés au 150e anniversaire aient lieu à l'UNESCO et d'avoir ainsi une audience mondiale.

ILAC

Les interactions avec l'ILAC se sont concentrées sur les documents ILAC P10:07/2020 « ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results », ILAC P14:09/2020 « ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration » et ILAC G18:04/2010 « Guideline for the Formulation of Scopes of Accreditation for Laboratories ».

Le document « Joint ILAC-CIPM Communication regarding the Accreditation of Calibration and Measurement Services of National Metrology Institutes » (Communication commune à l'ILAC et au CIPM sur l'accréditation des services d'étalonnage et de mesure des laboratoires nationaux de métrologie) a été révisé et de nouveau signé en 2020.

ONUDI

Le BIPM a participé à l'initiative de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) et à la publication qui en a découlé, intitulée « Quality Policy Guiding Principles », dont l'objectif est de faciliter la mise en œuvre efficace de l'infrastructure de la qualité dans les pays en développement. Le BIPM a également contribué à la rédaction de la méthodologie qui apparaît dans la publication sponsorisée de l'ONUDI intitulée « Quality Infrastructure for Sustainable Development Index (QI4SD) ». L'indice QI4SD est applicable à l'infrastructure de la qualité pour le développement durable ; il permet de comparer la contribution individuelle (métrologie) à l'infrastructure de la qualité et favorise l'amélioration continue et l'apprentissage mutuel.

OMC

Le personnel du BIPM continue à représenter le BIPM lors de réunions régulières du Comité sur les barrières techniques au commerce (OTC) de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) ; le BIPM a également été invité à prendre la parole lors de sessions thématiques consacrées à l'infrastructure de la qualité et au renforcement des capacités.

OCDE

Le BIPM continue à contribuer au travail d'analyse au sein du partenariat de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) en faveur d'un processus de réglementation internationale efficace (*Partnership for effective international rule-making*) : le BIPM est notamment le point de contact de l'un des groupes de travail sur les possibilités de coordination entre les organisations internationales et peut ainsi s'assurer que le rôle des activités et structures du système métrologique mondial au sein de l'infrastructure de la qualité est reconnu comme essentiel. Le directeur du BIPM a participé en tant que panéliste à des réunions de haut niveau de l'OCDE rassemblant des dirigeants d'organisations internationales.

L'étude commune au BIPM et à l'OCDE, rédigée dans le cadre du partenariat de l'OCDE avec les organisations internationales et intitulée « The Case of the International Bureau of Weights and Measures », a été publiée en février 2020.

CCNUCC

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CNUCC) a accepté d'octroyer au BIPM le statut d'observateur lors de la Conférence des parties sur les changements climatiques de 2022 (COP 27) du 7 au 18 novembre 2022. L'admission est une étape unique : une fois le statut d'observateur acquis, le BIPM pourra participer activement aux futures Conférences des parties, sans avoir à suivre de nouveau le processus de candidature.

INetQI (précédemment Réseau DCMAS)

Le personnel du BIPM participe activement au réseau InetQI qui permet à des organisations intergouvernementales et organismes internationaux (dix à l'origine) d'échanger afin de promouvoir un système efficace de métrologie, d'accréditation et de normalisation dans les pays en développement. Le réseau a accompli des progrès majeurs ces dernières années : il s'est étendu et compte désormais 14 membres, les membres les plus récents étant l'Independent International Organisation for Certification (IIOC) et l'International Certification Network (IQNET). L'INetQI travaille à développer le concept d'une « bibliothèque unique » de l'INetQI rassemblant les ressources de la communauté de l'infrastructure de la qualité.

Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM)

Le JCGM est présidé par le directeur du BIPM. Le CIPM maintient sa représentation au sein du JCGM : P. Neyezhmakov représente actuellement le BIPM au sein du JCGM et du Groupe de travail 2 du JCGM sur le Vocabulaire international de métrologie (VIM) (Décision CIPM/108-17).

Le CIPM a décidé (Décision CIPM/110-2) de soumettre un vote favorable au JCGM concernant la publication du GUM 6 (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure — Partie 6 : Élaboration et utilisation des modèles de mesure).

Le Groupe de travail 2 du JCGM sur le VIM a effectué depuis 2018 un travail considérable afin de développer la prochaine édition du Vocabulaire international de métrologie (VIM4) qui doit être publiée dans un futur proche.

Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM)

L'International Council for Standardization in Haematology (ICSH) est devenu l'une des organisations membres du Comité exécutif du JCTLM en décembre 2019, rejoignant ainsi le BIPM, l'IFCC et l'ILAC. Lors de sa réunion de mars 2019, le CIPM a nommé deux de ses membres, T. Liew et S.-R. Park, pour le représenter au sein du Comité exécutif du JCTLM.

La base de données du JCTLM a été mise à jour, sa nouvelle version a ainsi été lancée le 1er octobre 2022. Cette dernière fonctionne à partir d'un système d'exploitation qui pourra être maintenu pendant les dix prochaines années et qui rend les données lisibles par machine. En moyenne, une centaine de données sont soumises et examinées chaque année et celles répondant aux critères fixés par le JCTLM sont intégrées à la base de données. La base de données contient actuellement 257 matériaux de référence, 213 méthodes de référence et 203 services de mesure de référence, qui peuvent être utilisés par l'industrie des diagnostics *in vitro* afin de répondre aux exigences en matière de traçabilité métrologique.

Le JCTLM a organisé deux ateliers des membres et parties prenantes, l'un en 2019 et l'autre en 2021. L'atelier de 2021, qui a été organisé en ligne et a compté près de 500 participants venant de 65 pays, a permis de formuler des recommandations quant à la façon pour les laboratoires d'analyse de faire face à la standardisation des matériaux de référence et réglementations.

Le secrétariat du JCTLM est assuré par le BIPM et ses frais de fonctionnement sont pris en charge conjointement par le BIPM et l'IFCC. L'accord de financement entre le BIPM et l'IFCC devrait être renouvelé en 2023 ; des contributions volontaires sont recherchées en 2022 afin que la soumission et l'examen des données puissent être effectués en ligne dans la base de données du JCTLM.

4. Réviser la stratégie concernant les futurs États Membres et Associés.

Lors des deux dernières décennies, la participation aux activités du BIPM a augmenté de façon significative. Les États et Entités économiques dont le système métrologique est émergent, et qui ont souvent des capacités et ressources très limitées, considèrent que les options actuelles de participation ne répondent pas à leurs besoins (il est à rappeler que le statut d'Associé concerne surtout la participation au CIPM MRA). Le moment est venu d'examiner comment l'Article III de la Convention du Mètre est actuellement appliqué et comment cet article pourrait être mis en œuvre afin de faciliter une adhésion durable et universelle à la Convention du Mètre, ce qui fait l'objet du Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre ».

5. Moderniser le fonctionnement de l'organisation

Parmi les récentes activités du Groupe de réflexion 5 du Sous-comité du CIPM sur la stratégie figure la rédaction de Règles de fonctionnement et du Code de conduite du CIPM. Le CIPM a approuvé la version 1.1 des Règles de fonctionnement et la première édition du Code de conduite. Dans le cadre d'un examen global, le CIPM a engagé des discussions approfondies en 2019 sur l'indépendance et les responsabilités de ses membres.

En tenant compte des rapports du Groupe de travail *ad hoc* des représentants des États Membres, le CIPM a demandé au directeur du BIPM de commencer à rédiger des « By-Laws » du BIPM (ou statuts et réglementation d'une organisation). Il a été fait appel à Peter Quayle, juriste spécialisé dans les questions de droit international public, notamment concernant la législation interne, la gouvernance et les immunités de juridiction des organisations internationales, pour commencer le projet. Les by-laws constituent un instrument de gouvernance écrit relatif au fonctionnement d'une organisation internationale et sont complémentaires de son instrument constitutif. Ils sont l'instrument de gouvernance le plus approprié dans de nombreuses organisations internationales. Les règles de fonctionnement sont également un instrument de gouvernance ; elles régissent en détail le fonctionnement d'un organe ou d'une entité. Pour résumé, les by-laws renforcent la transparence, l'accessibilité et la modernité de la gouvernance d'une organisation internationale. Le CIPM invite la CGPM à sa 27e réunion à lui confier le mandat de continuer à développer des by-laws qui seront présentés et approuvés par la CGPM à sa 28e réunion (2026). Les États Membres seront largement consultés pendant la préparation des by-laws afin de s'assurer de leur implication à toutes les étapes du processus d'élaboration des by-laws.

10.5 Comités consultatifs du CIPM

Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV)

Le CCAUV s'est réuni deux fois depuis la 26e réunion de la CGPM (2018). Les métrologistes dans le domaine de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau représentent une communauté diversifiée et géographiquement disséminée. Ainsi, les réunions du CCAUV ne concernent pas seulement la reconnaissance mutuelle en matière de comparaisons et examens des CMCs mais elles constituent aussi un forum mondial où les participants peuvent décrire leurs travaux de recherche les plus récents et rendre compte des progrès effectués dans des domaines pertinents ;

ces réunions permettent de créer et maintenir des contacts avec d'autres experts et facilitent les discussions sur les questions en cours. Les réunions donnent également l'occasion d'avoir des échanges scientifiques et de faire des présentations thématiques sur les sujets métrologiques actuels de pointe pour le CCAUV. Depuis la dernière réunion de la CGPM, la coopération avec la Commission préparatoire de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) a été renforcée : une session d'une réunion du CCAUV a été consacrée à l'OTICE et des experts du CCAUV ont participé à des réunions techniques de l'OTICE. La collaboration entre le CCAUV et le groupe conjoint ISO/TC12 (Grandeurs et unités) et IEC TC25 (Grandeurs et unités) a été formalisée. Cette coopération est le fruit de la forte collaboration entre le CCAUV et l'ISO/TC12 (et l'IEC TC25) concernant la révision de la série de normes ISO 80000 en 2018-2019. Le CCAUV a révisé sa stratégie afin de définir les besoins métrologiques actuels et à venir pour les applications de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations et afin de cibler les activités du CCAUV. De nouveaux domaines d'étude et d'application ont été identifiés, tels que la spectroscopie acoustique, la spectroscopie photoacoustique, l'échographie pulmonaire et la transformation numérique.

Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM)

La mise en œuvre de la révision du SI le 20 mai 2019 a conduit à un changement d'amplitude d'environ 1×10^{-7} pour les grandeurs liées à la tension et de 2×10^{-8} pour les grandeurs liées à la résistance. Le CCEM avait publié pour les laboratoires nationaux de métrologie et leurs clients des directives sur la façon de gérer ces changements. Ces changements mineurs n'ont pas suscité de problèmes au sein de la communauté des parties prenantes. Le second cycle de comparaisons clés du CCEM est en cours. Concernant l'organisation des comparaisons clés, la charge de travail est de plus en plus souvent partagée entre un groupe de laboratoires nationaux de métrologie, chacun d'entre eux étant responsable d'un aspect spécifique de la comparaison. Le CCEM met en place un nouveau modèle d'organisation des comparaisons clés (schéma en étoile) qui devrait réduire de façon significative la durée des comparaisons. Le CCEM a créé un groupe de travail conjoint avec le CCRI afin d'utiliser une nouvelle génération d'instruments pour la mesure de faibles courants des chambres d'ionisation. Cela permettra de ne plus avoir besoin de vérifier la linéarité des électromètres actuellement utilisés à l'aide de sources radioactives scellées difficiles à obtenir et pouvant poser des risques de sécurité. En 2019, le CCEM a organisé un atelier sur les récents développements et défis de la métrologie des radiofréquences et des microondes auquel ont participé des spécialistes de l'industrie et du monde universitaire. En 2022, le CCEM a lancé une nouvelle série de webinaires du CCEM sur des sujets liés à la métrologie fondamentale et appliquée de l'électricité et du magnétisme.

Comité consultatif des longueurs (CCL)

Les activités du CCL comprennent les mesures pratiques de longueurs et d'angles (d'une seule dimension jusqu'à la 3D et de l'échelle subnanométrique jusqu'à des dizaines ou centaines de mètres) et les futurs étalons optiques de fréquence (pour la réalisation du mètre). Depuis la précédente réunion de la CGPM, le CCL s'est réuni une fois (selon un cycle d'une réunion tous les trois ans) et ses groupes de travail se sont réunis chacun trois ou quatre fois. Les CMCs dans le domaine des longueurs enregistrées dans la KCDB comme des équations numériques vont passer à des équations aux grandeurs tel qu'approuvé par le CIPM : près de 850 CMCs sont concernées. Le CCL a mis à jour la mise en pratique de la définition du mètre afin d'y inclure le réseau de silicium en tant que représentation secondaire du mètre, tel que suggéré par le Groupe de travail du CCL sur la nanométrologie dimensionnelle. Les trois méthodes existantes de réalisation du mètre décrites dans la mise en pratique sont le temps de vol de rayonnement léger, l'interférométrie laser (réalisation primaire) et le paramètre du réseau de silicium (réalisation secondaire). Le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence a développé et approuvé un document d'orientation sur les CMCs concernant

les lasers stabilisés de fréquence, ainsi que le protocole technique de la comparaison clé CCL-K11 sur les étalons optiques de fréquence et de longueurs d'onde. Une enquête a été conduite dans le cadre du projet du mètre numérique du SI et un groupe spécifique du CCL sur la transformation numérique a été établi afin de collecter et organiser les données. Une collaboration avec le BIPM est en cours afin de parvenir à un « mètre du SI numérique » qui permettra aux utilisateurs d'obtenir, en temps réel, les valeurs les plus récentes approuvées par le CIPM concernant les fréquences étalons et d'autres paramètres liés aux longueurs. Le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA a approuvé un document d'orientation qui liste les bonnes pratiques et d'autres sources d'information concernant la métrologie des longueurs et un document sur la révision du modèle de codage utilisé pour numéroter les comparaisons menées dans le cadre du CIPM MRA. Le CCL a participé à la publication d'un numéro spécial de *Metrologia* sur les longueurs : 15 articles ont déjà été publiés et deux autres sont en cours de révision. Depuis la dernière réunion de la CGPM (2018), la liste des étalons optiques de fréquence utilisés pour réaliser le mètre et des représentations secondaires de la seconde a été mise à jour par le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence puis adoptée par le CIPM après approbation du CCTF. La coopération entre le CCL et le Comité technique 213 de l'ISO (ISO/TC 2013 - Spécification géométrique des produits) a été formalisée.

Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM)

Deux réunions du CCM se sont tenues entre 2019 et 2022, l'une les 16 et 17 février 2019 et l'autre les 20 et 21 mai 2021. Un atelier sur les nouvelles activités et les nouveaux développements de la métrologie des masses a été organisé au cours de la réunion du CCM de 2019. Une note détaillée sur les phases de la dissémination du kilogramme a été approuvée et les progrès effectués une fois cette note publiée ont été examinés lors des réunions du CCM. Parmi les décisions majeures prises lors des deux réunions du CCM figurent la fusion de deux groupes de travail et la formulation d'une demande du CCM au JCRB concernant la possibilité d'ajouter une note explicative permettant de clarifier l'Annexe A1 du document CIPM-MRA-P11. Concernant la redéfinition du kilogramme, la première comparaison clé des réalisations du kilogramme, CCM.M-K8, s'est terminée en 2019. La dissémination de l'unité de masse à partir de la valeur de consensus du kilogramme est entrée en vigueur le 1er février 2021 et les CMCs de 31 laboratoires nationaux de métrologie ont dû être ajustées dans la KCDB. La seconde comparaison clé des réalisations du kilogramme a été lancée fin 2021 et le projet A de rapport a été transmis aux participants. Le nombre de participants est passé de 7 à 9 entre la première et la seconde comparaison. Une version totalement révisée de la stratégie du CCM pour 2022-2032 a été produite par le Groupe de travail du CCM sur la stratégie et la coordination du CIPM MRA. Deux documents d'orientation du CCM sur les comparaisons ont été révisés. La procédure d'approbation des rapports de comparaison a été simplifiée afin d'accélérer la publication des résultats de comparaison. Des documents d'orientation spécifiques permettant une approche efficace des exercices d'examen des CMCs ont été élaborés au sein de certains groupes de travail et sont en cours de développement dans d'autres.

Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR)

Le CCPR a contribué à finaliser des documents clés concernant la définition de la candela et sa mise en pratique. Le travail effectué concernant la future redéfinition de la candela et le document « Key Scientific questions of the SI unit of luminous intensity, the candela » ont été présentés lors de la 25e réunion du CCU (2021). En outre, le CCPR a réalisé un travail de fond afin de se fixer un objectif stratégique à long terme, qui est de mettre en place un système photométrique scientifiquement rigoureux fondé sur les sensibilités spectrales des cônes, ce qui permettra de fournir un nouveau lien entre les grandeurs photométriques et radiométriques.

Le CCPR a discuté de l'adoption d'une approche axée sur les risques pour examiner les exigences et donner des orientations concernant la portée des comparaisons clés en termes de soutien aux CMCs. Des graphiques et listes de vérification sont intégrés afin de s'assurer que toutes les exigences sont clairement indiquées et sont utiles à ceux qui procèdent à l'examen des CMCs. Le CCPR a collaboré avec l'OMM afin de garantir la traçabilité au SI de ses mesures d'éclairement.

Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie (CCQM)

Les réunions du CCQM et de ses groupes de travail de 2020 à 2022 se sont tenues en ligne : le siège du BIPM a ainsi hébergé 194 réunions en ligne, dont les 26e et 27e réunions plénières. La stratégie révisée du CCQM et les plans techniques pour 2021-2030 des groupes de travail ont été publiés le 21 juin 2021. Le CCQM a continué d'organiser des comparaisons : 50 nouvelles comparaisons ont été lancées et 47 rapports finaux publiés. Le CCQM a réagi de façon rapide afin de soutenir les réponses métrologiques apportées par les laboratoires nationaux de métrologie au SARS-CoV-2. Deux comparaisons ont été organisées et la feuille de route « CCQM roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response » élaborée à la suite d'une série de webinaires et ateliers a été publiée.

Le CCQM a encouragé l'implication des parties prenantes par l'intermédiaire de ses groupes spécifiques, notamment en ce qui concerne la mise en œuvre de nouvelles valeurs de la section efficace d'absorption de l'ozone, les étalons nécessaires à la communauté de la surveillance des émissions de gaz à effet de serre, et la métrologie des microplastiques. Des ateliers en ligne avec les parties prenantes ont été organisés autour de thèmes concernant les domaines émergents, notamment la métrologie des microplastiques, la métrologie des particules, la métrologie et les systèmes viraux considérés comme outils métrologiques, l'utilisation de la spectrométrie de masse dans la métrologie des radionucléides (en coopération avec le CCRI), la métrologie des grandeurs dont la valeur peut être déterminée par comptage (en coopération avec le CCU).

Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI)

Le nouveau Groupe de travail du CCRI sur l'imagerie quantitative et la thérapie par radionucléides, qui rassemble des métrologistes et des parties prenantes de la communauté médicale, a pour objectif d'examiner les questions métrologiques qui se posent dans les domaines en rapide évolution de la thérapie utilisant des radionucléides et de l'imagerie nucléaire quantitative. Un nouveau groupe spécifique, le Groupe de travail commun au CCRI et au CCEM sur les mesures des faibles courants, a été créé afin de collaborer avec le CCEM pour tirer parti des développements de la métrologie à faible courant et améliorer les mesures effectuées à l'aide de chambre d'ionisation largement utilisées dans les applications médicales et liées à la radioprotection.

Le CCRI a travaillé avec le CCQM afin de comprendre comment les développements métrologiques en spectrométrie de masse peuvent être appliqués dans le domaine des rayonnements ionisants car la spectrométrie de masse est utilisée de façon croissante pour mesurer des radionucléides de faible activité (par exemple dans l'environnement) ou à longue durée de vie (par exemple pour les déchets nucléaires ou la criminalistique nucléaire). Les contraintes imposées par la pandémie de Covid-19 sur les pratiques de travail ont catalysé le développement de nouveaux mécanismes virtuels de communication et d'implication de la communauté des rayonnements ionisants. Ainsi, une série de 17 webinaires a permis de rassembler les parties prenantes et les métrologistes du monde entier, totalisant 1 277 participations de 89 États et Entités économiques. Le Groupe de travail du CCRI sur la communication a été créé afin d'examiner comment ces webinaires et d'autres outils de communication (en personne et en ligne) peuvent être utilisés pour soutenir les objectifs du CCRI.

Comité consultatif de thermométrie (CCT)

La redéfinition du kelvin (K) et sa mise en pratique ont pour effet notable d'augmenter les travaux de recherche sur le long terme ayant pour sujet des méthodes de thermométrie primaire pour la réalisation et la dissémination de l'échelle des températures. En particulier, les différents instruments primaires conçus pour déterminer la constante de Boltzmann sont désormais utilisés pour mesurer la température thermodynamique sur une large plage de températures afin d'établir la différence entre la température thermodynamique et l'échelle de température actuelle, l'EIT-90. Les nouvelles méthodes d'*auto-étalonnage*, photoniques et de thermométrie primaire pratique ont progressé de façon significative et toutes pourraient changer la façon de disséminer la température sur le long terme. Tous les domaines de mesure couverts par le CCT (température, humidité et grandeurs thermophysiques) sont profondément transversaux et contribuent aux sept domaines clés prioritaires identifiés par le CIPM, à savoir le changement climatique et l'environnement, la santé et les sciences de la vie, la sécurité alimentaire, l'énergie, la fabrication de pointe, la transformation numérique, et la nouvelle métrologie. Parmi les récents exemples figurent le travail entrepris pour améliorer la mesure de température corporelle à l'échelle mondiale en réponse à la pandémie de Covid-19 et l'importante collaboration avec la communauté de la météorologie pour améliorer la traçabilité des grandeurs climatiques essentielles, telles que la température de l'air et son taux relatif d'humidité.

Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF)

Le CCTF a concentré ses activités sur quatre « sujets stratégiques » pour lesquels des décisions devront être prises ces prochaines années. Ces sujets sont les suivants :

1. la redéfinition de la seconde du SI fondée sur une transition optique,
2. une révision de la procédure concernant la seconde intercalaire en vue de réaliser un UTC continu,
3. les exigences permettant d'étayer la traçabilité à l'UTC par des mesures fondées sur les systèmes GNSS,
4. l'établissement d'un projet de renforcement des capacités fondé sur des ressources partagées avec les laboratoires nationaux de métrologie, en partenariat avec l'IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society (UFFC), l'objectif étant de transférer la technologie permettant la réalisation d'une échelle de temps locale UTC(k) robuste et d'obtenir une implication plus large concernant la génération et la dissémination de l'UTC.

Un numéro spécial de *Metrologia* sur ces sujets stratégiques est en préparation. Le CCTF a préparé deux projets de résolution pour la 27e réunion de la CGPM : le projet D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC » et le projet E « Sur la future redéfinition de la seconde ».

Comité consultatif des unités (CCU)

À la suite de la mise en œuvre de la révision du SI le 20 mai 2019, le CCU a mené une enquête sur l'impact des redéfinitions des unités auprès des laboratoires nationaux de métrologie, des organismes de liaison du CCU et du monde universitaire. Aucun des laboratoires nationaux de métrologie n'a signalé de difficultés dans la mise en œuvre de la révision du SI et tous ont indiqué que les informations communiquées avaient été suffisantes. Certains ont mentionné que la révision du SI générait de nouvelles possibilités de technologies innovantes. De façon générale, les organismes de liaison du CCU considèrent avoir été suffisamment informés des changements et avoir été consultés de manière appropriée. Pendant la préparation de la 9e édition de la Brochure sur le SI, des questions ont été soulevées quant à la définition de certains termes métrologiques fondamentaux, tels que « grandeur » et « unité ». Le CCU a ainsi créé le Groupe de travail sur les termes métrologiques fondamentaux dans l'objectif de proposer des définitions pour ces termes qui sous-tendent les services métrologiques opérables par machine dans le cadre de l'infrastructure de la qualité.

Le CCU a reconnu que la façon dont les unités d'angle sont actuellement intégrées au SI soulèvent des questions. La majorité des membres du CCU soutiennent l'approche actuelle qui traite le radian comme une unité dérivée. Le Groupe spécifique du CCU sur les angles et les grandeurs sans dimension dans la Brochure sur le SI a été créé afin de rendre plus claires les sections de la Brochure sur le SI relatives aux unités d'angle.

Le CCU a préparé le Projet de résolution C « Sur l'extension de la liste des préfixes du SI » pour la 27e réunion de la CGPM (2022) afin de tenir compte des besoins de la science des données concernant l'expression d'importantes quantités d'informations numériques. Le CCU suit les travaux de préparation du CCTF sur la redéfinition à venir de la seconde. En 2019, un atelier intitulé « Advanced time and frequency transfer: the ultimate frontier for remote comparison methods » a été organisé.

10.6 CIPM MRA

Le CIPM MRA est hautement apprécié par les États Membres et demeure une responsabilité majeure du BIPM. Actuellement, 250 laboratoires participent au CIPM MRA ; ils regroupent 97 laboratoires nationaux de métrologie et 149 laboratoires désignés venant de 64 États Membres et 36 Associés, ainsi que quatre organisations internationales : l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), le Centre commun de recherche (JRC), et l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

Base de données sur les comparaisons clés (KCDB) 2.0

La nouvelle version de la KCDB lancée le 29 octobre 2022, la KCDB 2.0, offre une plateforme web collaborative de soumission et d'examen en ligne des CMCs, ainsi que des fonctionnalités de recherche étendues. La nouvelle plateforme permet de soumettre, examiner et publier des CMCs, ainsi que d'enregistrer des comparaisons et d'effectuer des mises à jour dans tous les domaines métrologiques. Elle fournit des statistiques qui peuvent être paramétrées par organisation régionale de métrologie, pays ou domaine de métrologie.

Une autre amélioration de la KCDB 2.0 a été apportée avec le lancement en 2021 d'une interface de programmation d'applications (API) permettant la recherche automatique parmi les CMCs. L'API de la KCDB fournit des données en fonction des requêtes sur les CMCs. L'API représente la première étape pratique vers les certificats d'étalonnage numériques et pose le fondement des futurs développements et de nouveaux services numériques qui seront proposés par les laboratoires nationaux de métrologie.

La maintenance de la KCDB constitue une charge de travail constante pour le BIPM, avec un total de plus de 25 000 CMCs et 1 700 comparaisons enregistrées la KCDB.

GULFMET

Dans sa Décision CIPM/110-13, le CIPM a décidé, en tenant compte des critères qu'il a fixés et de la Recommandation JCRB/43-1 (2021) du JCRB, d'accepter l'organisation régionale de métrologie *Gulf Association for Metrology* (GULFMET) comme membre à part entière du JCRB, ayant pouvoir de délibérer et de voter. GULFMET était reconnue de façon provisoire par le JCRB comme une organisation régionale de métrologie depuis 2015

Toutes les régions du monde disposent désormais d'une organisation régionale de métrologie pleinement établie.

10.7 Renforcement des capacités et transfert des connaissances (CBKT)

Le programme du BIPM de renforcement des capacités et de transfert des connaissances (CBKT) vise à accroître l'efficacité avec laquelle les États Membres et les Associés participent au système métrologique mondial. Le programme CBKT évolue constamment afin de répondre aux besoins des laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés des États Membres et Associés. Il comprend une grande variété d'options telles que : des ateliers/séminaires organisés au siège du BIPM et dans les laboratoires nationaux, généralement en collaboration avec les organisations régionales de métrologie ; des activités en ligne d'apprentissage à distance (formations de courte durée, échanges techniques et plateforme d'apprentissage en ligne) ; des détachements dans les laboratoires du BIPM et dans des laboratoires nationaux partenaires ; ainsi que des publications favorisant le transfert de connaissance, telles que des brochures. Les initiatives du programme CBKT sont ouvertes à tous les pays, qu'ils disposent ou non d'une infrastructure métrologique bien établie.

La crise du Covid-19 a accéléré l'objectif stratégique d'offrir aux laboratoires nationaux et désignés des possibilités d'apprentissage à distance. Après la mise en place de l'apprentissage à distance en 2020, sous la forme de formations de courte durée et d'échanges techniques, le BIPM a franchi une étape supplémentaire en 2021 en développant une solution d'apprentissage en ligne contenant du matériel interactif sur le CIPM MRA et sur les activités scientifiques du BIPM. En 2022, la plateforme d'apprentissage en ligne du BIPM a évolué pour pouvoir héberger du contenu proposé par les organisations régionales de métrologie intéressées. La plateforme est accessible en continu sur tout appareil mobile et apporte aux métrologistes une solution d'aide à l'apprentissage la plus pratique possible.

10.8 Perspectives pour le futur

Afin de relever de manière efficiente et efficace les défis scientifiques et sociétaux actuels et à venir, le BIPM doit faire constamment évoluer ses pratiques vers une meilleure gouvernance afin de conserver sa pertinence et rester à la pointe de la métrologie dans le monde moderne. Quelles sont les questions que la métrologie scientifique devra traiter d'ici 2030 et après 2030 ? Quelles sont les technologies disruptives qui façonneront notre futur ? Comment l'organisation devra s'adapter pour répondre aux évolutions à venir ? Et comment pouvons-nous soutenir les grands défis auxquels nos sociétés sont confrontées, comme le fait d'assurer une bonne santé et une bonne qualité alimentaire, de lutter contre le changement climatique et de s'orienter vers une infrastructure énergétique durable ?

Dans un monde où l'infrastructure de la qualité devient de plus en plus importante comme approche intégrée permettant d'assurer l'interopérabilité, la sécurité alimentaire, la protection de l'environnement, l'efficacité des soins de santé et le respect des lois, il est essentiel pour le BIPM d'établir des coopérations avec d'autres organisations internationales afin de pouvoir relever les défis.

Tels sont les concepts dont le CIPM tient compte lors de l'élaboration d'une stratégie plus vaste pour l'avenir - qui doit se traduire par un plan de mise en œuvre ciblé et pratique - du moins dans un avenir prévisible. Au cours des quatre prochaines années, l'accent sera donc mis sur l'élaboration de la stratégie qui sera présentée lors des célébrations du 150e anniversaire de la signature de la Convention du Mètre, le 20 mai 2025, l'objectif étant de publier la version finale en 2026. Cela permettra de présenter une nouvelle vision et une nouvelle mission pour le BIPM lors de la 28e réunion de la CGPM.

Il est prévu de procéder à une vaste consultation au sujet de la manière d'accroître la participation à l'organisation, ce qui la rendrait véritablement universelle, et de parvenir à un consensus, de sorte qu'un projet de résolution puisse être présenté lors de la 28e réunion de la CGPM concernant la manière d'intégrer les États membres des Nations Unies, ainsi que d'autres Entités économiques, qui n'y participent pas encore.

Le CIPM, continuera à élaborer un règlement intérieur pour les organes de l'organisation et des by-laws conformément à la pratique moderne au sein des organisations internationales. Il s'agit notamment de travailler en étroite collaboration avec les représentants des États Membres pour clarifier la terminologie utilisée en interne et en externe, afin de refléter la nature universelle de l'organisation.

10.9 Conclusion

La période de 2020 à 2022 a posé des défis sans précédent au CIPM et à l'ensemble de l'organisation. Avec le recul, le CIPM et le personnel du BIPM, les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés, ainsi que les organisations régionales de métrologie ont été en mesure de poursuivre l'unification du système international d'unités. Le BIPM et les laboratoires nationaux de métrologie ont su répondre aux besoins en matière de mesures, ce qui a été crucial dans la lutte contre la pandémie de Covid-19. Les rapports des laboratoires nationaux de métrologie présentés lors des réunions des directeurs en 2020 et 2021 ont montré comment les laboratoires nationaux de métrologie, dans des délais très courts, ont fourni les mesures et matériaux de référence nécessaires pour surveiller la pandémie et développer des vaccins. Des instruments de mesure et des équipements vitaux comme les ventilateurs ont été mis au point. Les réunions se sont poursuivies en ligne et les comparaisons d'étalons nationaux de mesure ont été réalisées. Le CIPM a publié sur le site internet du BIPM les rapports décrivant ces actions, ce qui témoigne de la résilience de notre organisation et des laboratoires de métrologie de ses États Membres et Associés. Alors que la pandémie a été lentement maîtrisée et qu'une certaine normalité est revenue, de nouveaux défis sont apparus en 2022 qui mettront encore plus à l'épreuve la détermination de l'organisation. Les actions et les succès rencontrés de 2019 à 2022 et présentés lors de cette conférence montrent que le BIPM et l'ensemble des acteurs du système de mesure ont la volonté de perdurer et de poursuivre l'unification mondiale du système international de mesure dans le cadre du Système international d'unités (SI). Ce fut un privilège pour le CIPM en exercice de 2018 à 2022 de servir l'organisation et nous soutiendrons pleinement les représentants de notre communauté que la CGPM élira comme membres du CIPM en 2022.

Le président de la CGPM remercie M. Louw pour son rapport complet et souligne qu'il rend compte d'un certains nombres de réalisations remarquables, de nombreuses futures actions possibles et d'une vision claire du travail à accomplir.

Le directeur du BIPM apporte deux précisions. Au 15 novembre 2022, on compte 64 États Membres. Toutefois, le nombre d'États Membres au moment de la dernière réunion du CIPM en juin 2022 était de 63, c'est donc ce nombre auquel il est fait référence dans certains documents qui ont été préparés pour la Conférence. Ainsi, les documents mentionnant 63 États Membres ne comporte pas d'erreur, cela reflète simplement le nombre d'États au moment où ils ont été rédigés.

M. Milton ajoute que la première séance de la CGPM compte 93 participants en ligne : il remercie les délégués d'avoir approuvé la procédure spéciale, ce qui permet de partager les activités et discussions de la Conférence avec une plus large audience, certains membres de délégations assistant à la réunion à distance. Cela s'inscrit dans l'esprit de modernisation souligné par le président du CIPM.

Deuxième séance – 15 novembre 2022 (après-midi)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la deuxième séance.

11. Compte rendu du directeur du BIPM sur les principales réalisations du BIPM

M. Milton présente les principales réalisations du programme de travail approuvé lors de la dernière réunion de la CGPM. Il rappelle que le principal sujet de la 26e réunion de la CGPM (2018) a été la redéfinition des unités de base du Système international d'unités (SI), c'est pourquoi il commencera par présenter les activités les plus directement liées aux nouvelles définitions, à savoir le travail du Département de la métrologie en physique concernant la réalisation du kilogramme.

Le Département de la métrologie en physique a organisé et participé à deux comparaisons clés des réalisations du kilogramme, CCM.M-K8.2019 et CCM.M-K8.2021, à l'aide de la balance de Kibble du BIPM, comme le prévoyait le programme de travail pour 2020-2023. La balance de Kibble du BIPM continue à fonctionner avec une incertitude type de 41 µg au niveau de 1 kg ($4{,}1 \times 10^{-8}$) et dépasse ainsi l'objectif de 50 µg au niveau de 1 kg. Le département continue à proposer des étalonnages de masse et d'autres services : ainsi, 87 % des laboratoires nationaux de métrologie des États Membres ont bénéficié d'étalonnages de masse depuis 2012. Le Département de la métrologie en physique poursuit ses progrès concernant les étalons quantiques transportables utilisés pour des comparaisons sur site. Le département a testé deux types d'étalons de résistance de Hall quantifiée à base de graphène et a confirmé des performances satisfaisantes aux paramètres opérationnels cibles, 4,2 K et 3,5 T. L'utilisation de graphène devrait faciliter le développement d'étalons quantiques plus faciles à transporter, aux coûts de fonctionnement réduits et qui n'utilisent pas de cryogènes liquides. Le département développe un nouveau schéma de comparaison d'étalons de tension en courant alternatif, en coopération avec un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie. Au total, 86 % des laboratoires nationaux de métrologie des États Membres ont eu recours aux services de mesure électriques depuis 2012.

Le directeur présente la progression de la participation aux réalisations primaires de la seconde entre 2018 et 2022 à partir d'un graphique sur le calcul mensuel de l'UTC. Ce calcul reposait en 2018 sur des horloges à jet de césium, des fontaines à césium et une fontaine à rubidium : les premiers résultats obtenus à partir d'horloges optiques ont été intégrés au calcul de l'UTC cette année-là. En 2022, cinq horloges optiques contribuent de façon régulière au calcul de l'UTC, ce qui démontre la possibilité d'une définition de la seconde fondée sur des horloges optiques. Le calcul de l'UTC devient de plus en plus exact et résilient. Le BIPM assume la responsabilité du calcul de l'UTC, qui incombait auparavant au Bureau international de l'heure (BIH), depuis 1998 : le nombre de laboratoires participants n'a cessé d'augmenter et se situe autour de 90 en 2022. L'exactitude de l'UTC est passée de quelques 10^{-13} dans les années 80 au niveau actuel de 10^{-16} et il est attendu que cette exactitude continue de s'améliorer à mesure que le nombre d'horloges optiques augmente. La participation des laboratoires nationaux de métrologie au calcul de l'UTC a augmenté pendant la pandémie de Covid-19, malgré les craintes de répercussions négatives. L'effort fourni pour maintenir l'UTC au cours de la crise montre clairement la résilience de l'UTC. Le directeur remercie les laboratoires nationaux qui ont fait de leur participation au calcul de l'UTC une priorité pendant la pandémie.

Le Département des rayonnements ionisants améliore et étend ses aptitudes en dosimétrie. Pour certains de ses services, le département a désormais recours à des installations externes afin de réduire les doublons dans les laboratoires du BIPM. Lors de la 26e réunion de la CGPM (2018), il avait été annoncé que le département avait lancé un service d'étalonnage des étalons secondaires des laboratoires nationaux et désignés pour les faisceaux de rayons x de hautes énergies (6 MV - 18 MV) auprès de l'installation DOSEO à Saclay (France). Le département propose désormais toute une gamme de services. Le département met en place, en collaboration avec l'AIEA à Vienne (Autriche), un équipement d'étalonnage dans les faisceaux de ^{137}Cs afin de mesurer l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. Un accord a été signé avec l'AIEA : des services de comparaison et d'étalonnage en matière d'exposition des travailleurs débuteront ainsi en 2023.

De nouveaux services améliorés de mesure de l'activité des radionucléides sont proposés, dont l'extension du Système international de référence (ESIR) qui couvre les émetteurs de rayonnement beta à l'aide de l'instrument TDCR disponible au siège du BIPM. Une étude pilote comptant 13 participants a été menée avec succès pour le ^{60}Co. Le système est prêt à être utilisé pour des services de comparaison d'émetteurs de rayonnement beta de hautes énergies. Les premières comparaisons à distance à l'aide de l'instrument de transfert du SIR (SIRTI) pour les radionucléides à courte durée de vie ont été réalisées avec succès à la PTB (Allemagne) et au KRISS (République de Corée). Le BIPM soutient les organisations régionales de métrologie dans le développement de leur propre version du SIR, qui pourrait ensuite être comparée à l'instrument disponible au siège du BIPM. Cela permettrait d'organiser des comparaisons au niveau régional de radionucléides à courte durée de vie en utilisant des copies du SIR. Au total, 76 % des membres et observateurs du CCRI ont participé à des comparaisons du Département des rayonnements ionisants.

Au Département de la chimie, la section sur la métrologie des gaz a mis en place le seul équipement au sein de la communauté des laboratoires nationaux de métrologie permettant de réaliser des mesures absolues du dioxyde de carbone. Cet équipement a été complété par un autre système pour pouvoir effectuer des mesures de référence des rapports isotopiques qui fournissent des informations sur les sources et les puits de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Par ailleurs, le département a travaillé sur différents schémas de traçabilité pour le dioxyde de carbone et a participé aux mesures des rapports isotopiques effectuées par la communauté mondiale.

La section sur l'analyse organique a développé des méthodes de référence pour les étalons de mesure des mycotoxines (pures et en solution). Des directives concernant l'analyse de pureté et l'évaluation du calibrateur ont été publiées en 2022 pour la patuline et le déoxynivalénol. En outre, le département soutient le développement de matériaux de référence certifiés au sein des laboratoires nationaux de métrologie. Le département a apporté son aide concernant une comparaison des mesures de diagnostic du Covid-19 réalisée dans un délai très court par la communauté des laboratoires nationaux de métrologie. La comparaison CCQM-P216 sur la quantification des anticorps monoclonaux du SARS-CoV-2 a été coordonnée par le NIM (Chine), le CNRC (Canada) et le BIPM. Dans le cadre de cette comparaison, la communauté du CCQM a réalisé pour la première fois une comparaison d'une protéine d'une taille aussi importante que les anticorps monoclonaux du SARS-CoV-2, avec un poids moléculaire de 150 kDa. Le programme de comparaisons visant à étayer le diagnostic et le traitement du diabète se poursuit, des comparaisons sur la pureté de l'hexapeptide de l'hémoglobine glyquée et non-glyquée (CCQM-K115.c) ont été achevées et leur rapport publié en 2022. Au total, 89 % des membres et observateurs du CCQM ont participé à des comparaisons du Département de la chimie.

Concernant les activités de transfert des connaissances, le Département de la chimie a continué à mettre en place des formations en ligne, au lieu d'avoir recours à des détachements, en raison des restrictions imposées par la pandémie de Covid-19. Le matériel de formation qui aurait été utilisé dans les laboratoires pour former des scientifiques invités a été retravaillé puis mis à disposition sur la plateforme

d'apprentissage en ligne du BIPM. Les formations en ligne sur la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) pour la caractérisation des étalons de gaz ont été suivies avec succès par des scientifiques du NIMT (Thaïlande) et du NMISA (Afrique du Sud) : ainsi, de nouveaux équipements FTIR ont été mis en service au sein de ces deux laboratoires nationaux de métrologie en 2022. Une formation en ligne sur l'analyse organique pour la caractérisation des matériaux de référence certifiés a comptabilisé près de cent inscriptions en 2021. Dans ces deux cas, les participants, après avoir suivi la formation dans sa totalité, ont eu l'occasion de participer à une comparaison afin de démontrer que le transfert de connaissances avait été assuré avec succès et que sa mise en pratique était efficace.

Les activités de renforcement des capacités et transfert des connaissances (CBKT) sont de plus en plus nombreuses depuis le lancement du programme CBKT en 2014. La communauté des laboratoires nationaux de métrologie a maintenu et élargi son soutien au programme et le directeur remercie les laboratoires nationaux et organisations régionales de métrologie pour leur soutien. Le programme CBKT a été un succès, avec près de 3 000 participations de laboratoires nationaux et désignés à ses activités depuis son lancement. Les formations CBKT avaient été conçues à l'origine pour être dispensées sur place au siège du BIPM. Récemment, de nombreuses formations ont été données en ligne, ce qui a eu pour effet d'augmenter le nombre de participations. En outre, certaines des activités de renforcement des capacités ont été réalisées sur des sites tiers : le directeur remercie en particulier TÜBITAK UME (Türkiye) d'avoir accueilli une série de détachements de renforcement des capacités, en coopération avec le BIPM.

Le BIPM a continué de moderniser sa communication. La nouveau site internet du BIPM a été lancé en avril 2021 ; en octobre 2022, il comptait 26 023 documents de travail, 10 074 comptes individuels d'utilisateurs, et 40 800 visites. La nouvelle version de la base de données sur les comparaisons clés (KCDB 2.0), mise en ligne le 29 octobre 2019, est totalement opérationnelle. L'un des objectifs d'une KCDB 2.0 était de simplifier certaines des procédures d'approbation des CMCs dans le cadre du CIPM MRA. Le temps nécessaire à l'examen interrégional des CMCs a été divisé par deux depuis la mise en œuvre de la KCDB 2.0, ce qui reflète le succès de la nouvelle version de la base de données. La technologie utilisée pour la KCDB 2.0 a été appliquée à la nouvelle version de la base de données du Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM) qui a été mise en ligne le 3 octobre 2022.

Le BIPM a été actif dans le domaine de la communication et des relations internationales, en particulier concernant la promotion de la métrologie auprès de communautés extérieures. Le BIPM et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) ont organisé un atelier sur le rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique en septembre 2022. L'objectif de cet atelier, qui a compté 1 078 participants en ligne, était de faire parvenir les communautés de l'OMM et des laboratoires nationaux à un consensus sur les priorités métrologiques. Cet atelier était le troisième organisé conjointement par les deux organisations. Le 6 novembre 2022, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CNUCC) a accepté d'octroyer au BIPM le statut d'observateur lors de la Conférence des parties sur les changements climatiques de 2022 (COP 27) qui s'est tenue à Charm-El-Cheikh (Égypte). Le BIPM aura ainsi la possibilité de soumettre, lors des prochaines conférences des parties, des documents et des informations proposés par le Groupe spécifique sectoriel du CIPM sur le changement climatique et l'environnement.

La Journée mondiale de la métrologie de 2022, organisée chaque année le 20 mai, avait pour thème « La métrologie à l'ère numérique ». Le poster a été conçu par le National Scientific Centre "Institute of Metrology" (Ukraine) en association avec COOMET. Le BIPM a œuvré pour que la Journée mondiale de la métrologie gagne en reconnaissance, en particulier pour qu'elle soit proclamée comme une Journée mondiale officielle par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). Obtenir la reconnaissance de l'UNESCO nécessite de suivre un processus diplomatique qui requiert le consensus de 190 États Membres. Le 13 octobre 2022, le Conseil exécutif

de l'UNESCO a fait un pas décisif vers la proclamation d'une Journée mondiale de la métrologie reconnue par l'UNESCO. La proposition a été officiellement présentée par le Kazakhstan avec le soutien du BIPM et de l'OIML. Des lettres de soutien vis-à-vis de cette initiative ont été reçues de 42 États Membres de l'UNESCO, dont dix États qui ne participent pas aux activités du BIPM en tant qu'États Membres ou Associés. La proclamation de la Journée mondiale de la métrologie devrait être approuvée en 2024. Le directeur salue le soutien fourni par l'ambassade du Kazakhstan à Paris tout au long de la procédure de candidature.

Le BIPM a poursuivi ses activités de collaboration avec la communauté internationale de l'infrastructure de la qualité. Il a coopéré avec l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) concernant le rapport « Quality infrastructure for sustainable development ». Le BIPM et l'OIML ont travaillé ensemble afin de rédiger le document conjoint « National metrology systems: developing the institutional and legislative framework », la CGPM ayant encouragé les deux organisations, lors de sa 26e réunion, à travailler de façon plus étroite. Ce document est essentiel au travail de l'OIML et constitue la première publication conjointe des deux organisations. Le BIPM et l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) ont travaillé ensemble concernant l'initiative sur les organisations internationales et la coopération réglementaire internationale, ce qui a permis de publier le rapport intitulé « The Case of the International Bureau of Weights and Measures ». Cette étude de cas se concentre sur le rôle du CIPM MRA dans le système réglementaire international. L'OCDE a accepté de soutenir et de réaliser une étude économique sur l'impact de la métrologie. Le BIPM et l'Union internationale des télécommunications – Secteur des radiocommunications (UIT-R) ont collaboré afin de produire un document d'orientation sur l'avenir d'un éventuel système de temps coordonné universel continu : « Report ITU-R TF.2511-0, Content and structure of time signals to be disseminated by radiocommunication systems and various aspects of current and potential future reference time scales, including their impacts and applications in radiocommunication ». Ce travail fait suite à la signature d'un protocole d'accord entre le BIPM et l'UIT en juin 2020.

Le BIPM a progressé au sujet de la transformation numérique et a organisé, du 22 au 26 février 2021, le premier événement majeur en la matière, à savoir l'atelier « The International System of Units (SI) in FAIR digital data ». Cet atelier a attiré plus de 700 participants et a permis à la communauté de la métrologie de discuter de l'initiative proposée par le CIPM de créer cadre numérique du SI. Le BIPM a lancé une enquête afin d'évaluer l'intérêt des laboratoires nationaux de métrologie qui participent aux Comités consultatifs du CIPM vis-à-vis de la transformation numérique et afin de connaître leurs objectifs immédiats. Ainsi, 56 % des laboratoires nationaux travaillent sur au moins un projet numérique ou prévoient d'en lancer un. Au total, 67 % des laboratoires nationaux travaillent sur des projets de certificats d'étalonnage numériques mais seulement 15 % étaient en mesure d'expliquer comment assurer la traçabilité métrologique au SI dans un certificat numérique. Une version du rapport d'enquête intitulée « Evaluation report survey on digital transformations » a été publiée sur le site internet du BIPM à des fins de consultation. Le BIPM a transformé deux de ses services numériques en développant des interfaces de programmation d'applications (API) : l'une pour la KCDB, l'autre pour la base de données du Département du temps. Ces API permettent un accès direct aux données lisibles par machine des bases de données et elles ont été accueillies de manière positive par les utilisateurs. Le BIPM a développé un prototype de rapport de comparaison numérique dans le Département des rayonnements ionisants et attend des retours de la communauté du CCRI concernant son utilité. Concernant la mise en œuvre d'un cadre numérique plus vaste du SI, la priorité est de mettre en place un point de référence unique du SI. Il s'agit d'une base de données structurée qui peut être interrogée par les utilisateurs dans différents formats d'entrée. Celle-ci respectera pleinement les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable - données faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables) et répondra aux besoins numériques de la communauté

d'utilisateurs de la Brochure sur le SI. L'objectif est que ce point de référence unique du SI remplace des sources d'accès au SI auxquelles les utilisateurs ont tendance à avoir recours, comme Wikipédia.

Le directeur félicite trois membres du personnel auxquels ont récemment été décernés des prix : Mme Tavella pour le prix Enrico Fermi (Société italienne de physique) et l'European Frequency and Time Award (European Frequency and Time Forum, EFTF), M. Petit pour le prix Marcel Ecabert (EFTF), et M. Henson pour le prix Wildhack (NCSLI). Deux nouveaux directeurs de département ont été recrutés depuis la 26e réunion de la CGPM : Vincent Gressier en tant que directeur du Département des rayonnements ionisants depuis août 2021 et Anna Cypionka en tant que directrice du Département des relations internationales, de la communication et de la stratégie à compter du 1er janvier 2023.

Le directeur donne quelques données et chiffres clés concernant le BIPM pour la période de janvier 2019 à octobre 2022. Le siège du BIPM compte 69 membres du personnel, dont 23 possèdent un doctorat. Au total, le BIPM a hébergé 640 'jours' de réunions impliquant 20 410 participants. Sur les 419 étalonnages effectués, 405 certificats d'étalonnage et 14 notes d'étude ont été produits. Les comparaisons du BIPM ont comptabilisé 687 participations de laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés. Concernant les activités du programme CBKT, on compte au total 2 692 participations de 125 pays : 47 pour le transfert de connaissances sur le travail de laboratoire, 174 lors d'ateliers de renforcement des capacités et 2 471 en ligne. La plateforme d'apprentissage en ligne du BIPM a attiré 670 utilisateurs de 115 pays. Elle compte 16 cours en ligne conçus par le BIPM et quatre par des organisations régionales de métrologie.

Le président de la CGPM remercie le directeur et demande s'il y a des questions ou commentaires.

M. Laiz (Argentine) remercie le directeur pour sa présentation et souligne le rôle unique joué par la balance de Kibble du BIPM dans la comparaison des réalisations primaires du kilogramme. De nombreux États Membres ne disposent pas d'une réalisation primaire et dépendent de la balance de Kibble du BIPM pour assurer la traçabilité de leurs mesures aux constantes fondamentales sans aucune restriction. Le directeur précise que le BIPM participe à la comparaison clé des réalisations du kilogramme à l'aide de sa balance de Kibble et que l'objectif de la comparaison clé est d'obtenir une valeur de référence (KCRV), qui sera intégrée aux artefacts d'étalonnage utilisés au siège du BIPM. Les États Membres ont accès, de cette façon, à la nouvelle définition du kilogramme pendant l'actuelle seconde phase de la mise en œuvre de la nouvelle définition du kilogramme.

Un membre de la délégation slovaque demande si le BIPM a des projets métrologiques dans le domaine de l'énergie de fusion nucléaire. Le directeur répond que ce n'est pas le cas dans l'immédiat ; toutefois, en raison de l'importance des mesures de l'énergie de fusion nucléaire, ce sujet devrait être intégré à la vision à long terme du CIPM qui sera présentée en 2025.

12. Présentation du Projet de résolution A sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie

M. Rietveld et Mme del Campo Maldonado présentent le Projet de résolution A « Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie ».

M. Rietveld rappelle qu'il y a 20 ans, la CGPM a invité le CIPM à présenter un rapport sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie. Le Rapport Blevin de 1998 et les Rapports Kaarls de 2003 et 2007 ont permis de déterminer quels étaient les besoins internationaux à long terme dans le domaine de la métrologie et de montrer que la collaboration internationale permettrait d'y répondre. Ces rapports

ont également souligné le rôle unique que le BIPM peut jouer en la matière. Les rapports Blevin et Kaarls ont joué un rôle important dans l'orientation donnée à la métrologie internationale et ont stimulé la coopération internationale. À la suite de la révision du SI en 2018, le CIPM a considéré qu'il était nécessaire de revenir sur ces rapports et d'étudier en particulier quels changements et défis dans les sociétés et économies créent de nouveaux besoins métrologiques et la façon dont le CIPM peut répondre à ces besoins afin de s'assurer que la métrologie reste pertinente au 21e siècle.

Au 20e siècle, les besoins dans le domaine de la métrologie étaient principalement liés aux disciplines techniques, ce qui était reflété au niveau du CIPM par les Comités consultatifs qui se concentraient chacun sur un domaine particulier. Les besoins métrologiques du 21e siècle diffèrent considérablement par leur nature : ils naissent de défis régionaux ou même mondiaux, ils sont liés à des progrès technologiques rapides (tels que la « révolution numérique »), et ils ont un caractère horizontal, requérant la coopération de nombreuses disciplines métrologiques pour apporter des réponses aux défis.

M. Rietveld précise que le CIPM a identifié cinq « grands défis métrologiques », à savoir le changement climatique et l'environnement, la santé et les sciences de la vie, la sécurité alimentaire, l'énergie, et la fabrication de pointe. En outre, deux défis transversaux sont liés à la façon de réaliser les mesures : il s'agit de la transformation numérique et de la « nouvelle métrologie » (comme les réseaux de capteurs ou les données d'un laboratoire sur puce). M. Rietveld ajoute que certains de ces défis, tel le changement climatique, ne relèvent pas d'une unique discipline et qu'ils nécessiteront la coopération de nombreux secteurs pour pouvoir être relevés. Dans le domaine de l'énergie, on assiste à une évolution vers le développement de sources d'approvisionnement énergétique plus durables, notamment par le remplacement des sources carbonées par des sources renouvelables. L'énergie renouvelable est parfois produite dans des zones reculées et exige d'être transportée vers les zones où elle doit être utilisée par le biais de réseaux électriques (voir section 47). Les défis métrologiques en la matière comprennent l'évaluation de l'efficience des panneaux photovoltaïques et des éoliennes et l'amélioration de la surveillance des réseaux électriques. Concernant cette surveillance, d'autres défis métrologiques se posent, comme l'utilisation accrue d'instrumentation numérique, les micro-réseaux, et l'établissement de liens entre les réseaux d'électricité, de gaz, de chauffage et de refroidissement. Le réseau électrique ne peut plus être considéré comme une entité unique ; la situation devient plus complexe avec le développement de technologies telles que les « jumeaux numériques » (*digital twins*) : ces derniers consistent en une copie numérique d'un système qui peut être utilisée pour évaluer comment les réseaux pourraient réagir dans différents scénarios, ce qui garantit la fiabilité des réseaux de transmission qui sous-tendent des infrastructures critiques. Ces tendances et les défis qui en découlent ont incité le CIPM à réfléchir à la manière dont les métrologistes peuvent apporter leur contribution pour relever ces défis et à la façon dont le CIPM peut promouvoir le rôle critique du BIPM et de la métrologie au niveau international.

Le CIPM a développé deux propositions sur la façon d'avancer pour relever les défis de l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie. La première est de créer des forums appropriés qui permettront de façonner et coordonner la réponse de la communauté de la métrologie à ces grands défis, l'objectif étant d'exploiter de façon coordonnée les nouvelles possibilités afin que la métrologie ait un impact sur les défis mondiaux transversaux. La seconde est de commencer à élaborer une nouvelle vision concernant le travail du BIPM en s'appuyant sur le rapport du CIPM sur l'évolution des besoins de la métrologie et en consultant la communauté mondiale de la métrologie afin de présenter cette vision lors du 150e anniversaire du BIPM en 2025 et de la publier en amont de la 28e réunion de la CGPM prévue en 2026.

M. Rietveld présente le texte du Projet de résolution A. Il note que le projet de résolution rappelle trois précédentes résolutions qui soulignent l'importance de ces exercices prévisionnels (Résolution 2 (2007), Résolution 1 (2018) et Résolution 3 (2018)). Le Projet de résolution A reconnaît l'importance

du SI pour répondre à l'évolution des besoins de la métrologie, le rôle critique de la métrologie pour relever les défis mondiaux et la nature de plus en plus multidisciplinaire des mesures en ce qui concerne les nouvelles technologies ou les technologies de rupture. Dans le projet de résolution, la CGPM encourage le CIPM à élaborer une vision à long terme qui veille à ce que le système mondial de mesures demeure pertinent et qu'il réponde de manière adéquate aux nouveaux défis métrologiques, à établir des groupes interdisciplinaires « horizontaux » pour relever ces nouveaux défis, et à présenter une nouvelle vision pour le BIPM qui s'appuie sur le rapport du CIPM sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie. M. Rietveld invite les États Membres à soutenir le Projet de résolution A et ajoute que le CIPM souhaite mettre en place certains des groupes interdisciplinaires horizontaux dès que possible afin de commencer à relever les défis et participer à l'élaboration de la vision à long terme pour le BIPM.

Mme del Campo Maldonado revient au thème des grands défis métrologiques et explique que le CIPM a décidé d'établir un Groupe spécifique sectoriel sur le changement climatique et l'environnement, au vu de l'urgence à agir en la matière. Les objectifs de ce groupe spécifique sectoriel sont de conseiller le CIPM sur tous les sujets qui entraînent des répercussions métrologiques dans le domaine du changement climatique et de l'environnement, notamment en ce qui concerne le programme de travail du BIPM et les activités techniques. Les Comités consultatifs disposeront ainsi d'informations qui les aideront à élaborer leur stratégie et activités, et de suggestions concernant les comparaisons internationales. Le groupe spécifique sectoriel collaborera avec les forums adéquats des organisations régionales de métrologie.

Mme del Campo Maldonado présente brièvement l'atelier sur le rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique organisé par le BIPM et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) du 26 au 30 septembre 2022. Cet atelier en ligne a attiré près de 1 000 scientifiques du monde entier et a permis d'identifier les actions requises pour que les futures avancées de la métrologie participent à l'adaptation au changement climatique et à l'atténuation des effets de ce dernier. L'atelier a principalement permis de formuler un ensemble de recommandations sur les défis techniques clés que la communauté de la métrologie doit relever. La communauté de la métrologique disposera ainsi d'un programme pour les dix prochaines années concernant les services de mesure et la recherche métrologique dans le domaine de l'environnement et du climat.

Le président de la CGPM remercie M. Rietveld et Mme del Campo Maldonado.

13. Rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique : résultats et perspectives de l'atelier BIPM-OMM

M. Anthony Rea, directeur du département des infrastructures de l'Organisation météorologique mondiale, donne une présentation invitée sur le rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique et sur les résultats et perspectives de l'atelier BIPM-OMM, qui s'est tenu du 26 au 30 septembre 2022. La présentation souligne l'importance des relations entre le BIPM et l'OMM.

M. Rea présente l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et indique qu'il s'agit d'une institution spécialisée de l'ONU qui se consacre aux questions relatives au temps, au climat et à l'eau. Elle compte 193 États Membres et son siège se situe à Genève (Suisse). Seconde plus ancienne institution de l'ONU depuis sa création en 1950, l'héritage de l'OMM remonte en réalité à la formation de l'Organisation météorologique internationale en 1873. Avec un effectif de 300 personnes, l'OMM coordonne le travail de milliers d'experts en météorologie et hydrologie issus de la recherche et du secteur privé. L'OMM a co-fondé et héberge le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution

du climat (GIEC). L'article 2 de la partie II de la Convention de l'OMM donne pour mandat à l'organisation de « [f]aciliter la coopération mondiale en vue de l'établissement de réseaux de stations effectuant des observations météorologiques, ainsi que des observations hydrologiques et d'autres observations géophysiques se rapportant à la météorologie ». La raison d'être de l'organisation est de réaliser, de diffuser et de coordonner des observations à l'échelle mondiale.

M. Rea explique que les informations sur la météo consultées sur les téléphones portables, internet ou encore données à la télévision ,reposent sur une infrastructure météorologique conséquente, cordonnée à l'échelle mondiale et exploitée en continu afin de générer des observations pour le monde entier et de diffuser des données dans tous les pays en temps réel. Les observations sont recueillies par une myriade d'appareils tels des stations sur site, des satellites, des navires, des bouées, etc. Les observations sont ensuite échangées pour alimenter des modèles de prévision météorologique numérique exécutés par des super-ordinateurs situés dans douze centres à travers le monde. Les données sont ensuite diffusées aux centres météorologiques et hydrologiques nationaux qui à leur tour offrent leurs services aux utilisateurs finaux. La mise en œuvre des services de météo et d'observation du climat dépend du bon fonctionnement de la chaîne de valeur météorologique. L'infrastructure météorologique coordonnée au niveau mondial repose sur des normes agréées fondées sur la traçabilité. La métrologie et les étalons établis afin de mesurer des variables météorologiques et hydrologiques sont à la base de la chaîne de valeur.

L'OMM compte cinq départements, y compris le département des infrastructures. En 2019, l'OMM a réorganisé ses commissions techniques pour les réduire de huit à deux : la commission des services et la commission des infrastructures (INFCOM). Le département des infrastructures comprend le Système d'information de l'OMM (SIO), qui englobe le Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM (SMISO) et le Système mondial de traitement des données et de prévision (SMTDP). Le SMTDP produit les données nécessaires pour que les membres de l'OMM puissent offrir leurs services. Le SMISO coordonne toutes les observations réalisées par l'OMM et ses membres. La Veille météorologique mondiale, qui est le système mondial d'observations météorologiques créé dans les années 50 à 60, fait partie du SMISO et coordonne les organismes d'observation de la Veille de l'atmosphère globale (VAG) qui surveille la composition atmosphérique. Le SMISO comprend également le Système d'observation hydrologique de l'OMM (SOHO) et la Veille mondiale de la cryosphère (VMC). Deux autres réseaux participent aux observations : le Système mondial d'observation du climat (SMOC) et le Système mondial d'observation de l'océan (SMOO).

M. Rea explique qu'il a assisté à la COP27 (Conférence des Parties) qui s'est tenue à Charm el-Cheikh (Égypte) du 7 au 18 novembre 2022. Il félicite le BIPM d'avoir obtenu le statut d'observateur à la COP et souligne que l'OMM jouit du même statut. L'OMM assiste à la COP pour présenter la météorologie aux parties et pour promouvoir les systèmes d'observation. L'OMM a présenté les projets suivants à la COP27 : son rapport sur l'état du climat, le plan d'action « Alertes précoces pour tous », une infrastructure pour la surveillance des gaz à effets de serre (GES) et le plan de mise en œuvre du Système mondial d'observation du climat. M. Rea ajoute que l'initiative « Alertes précoces pour tous » a été proposée par le Secrétaire général de l'OMM et par le Secrétaire général de l'ONU.

Au sujet de l'état du climat, M. Rea explique que la situation est critique en raison des niveaux record de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'augmentation annuelle du taux de méthane est la plus élevée jamais enregistrée. Si le méthane disparaît rapidement de l'atmosphère, il reste un gaz à effet de serre très puissant. Savoir pourquoi le taux de méthane a autant augmenté n'a pas encore entièrement trouvé réponse. Les années 2015 à 2022 pourraient bien être les huit plus chaudes jamais enregistrées selon de nombreux jeux de données différents. Tout ceci souligne combien la lutte contre le changement climatique est urgente. M. Rea rappelle que les jeux de données utilisés pour calculer la température annuelle moyenne à l'échelle de la planète reposent tous sur des données d'observation.

M. Rea indique que le Secrétaire général de l'ONU a choisi la Journée mondiale de la météorologie, le 23 mars 2022, pour annoncer que l'Organisation des Nations Unies compte mener de nouvelles actions pendant les cinq prochaines années pour assurer la protection de chaque habitant de la Terre par des systèmes d'alertes précoces. L'ONU a placé l'OMM à la tête de cette initiative. Le plan d'action présenté à la COP27 a reçu le soutien d'un grand nombre de pays. M. Rea explique que fournir des systèmes d'alertes précoces dans le monde entier exige des systèmes d'observation complets, un certain nombre de projets sont déjà en cours à ce sujet. Le département des infrastructures de l'OMM dirige un mécanisme de financement des observations systématiques (SOFF). Ce projet, dont l'objectif est de financer des systèmes d'observation de base dans les pays en développement et de les entretenir pendant leur durée de vie, montre que par le passé, le financement de projets ne portait que sur la construction d'infrastructures et non sur la maintenance de ces systèmes au fil du temps. M. Rea indique que la coopération avec le BIPM est essentielle pour assurer que chaque installation d'infrastructure s'accompagne d'un renforcement des capacités du pays concerné afin de garantir la traçabilité des observations. Cette démarche requiert des partenariats avec les laboratoires nationaux de métrologie. Les différents projets du système d'alertes précoces pour tous requerront un investissement de 3,1 milliards de dollars sur cinq ans, dont 1,8 milliard destinés aux observations et aux prévisions. Le SOFF, qui doit financer une partie de la somme, a déjà engagé 55 millions de dollars.

Le Système mondial d'observation du climat (SMOC), mis en place il y a 30 ans, est responsable de la définition des Variables Climatiques Essentielles (VCE). Un nouveau plan de mise en œuvre élaboré tous les cinq à six ans permet de mettre à jour les VCE, de déterminer les lacunes du système et de décider des actions à mener pour corriger ces dernières. Ce plan de mise en œuvre, soumis à l'approbation de la CCNUCC et des partenaires financiers du SMOC, formule des recommandations pour adapter le SMOC aux objectifs poursuivis sur le long terme. Le SMOC répond aux besoins en matière d'observations de l'ensemble du système climatique terrestre, dans l'atmosphère et les océans, de la cryosphère à la biosphère, en englobant les cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone. Le plan de mise en œuvre du SMOC de 2022 comprenait 57 VCE ainsi que les actions à entreprendre pour corriger les lacunes existantes. M. Rea indique que la COP27 a été le lieu de débats importants au sujet du plan de mise en œuvre du SMOC qui seront consignés dans les rapports de la session plénière : un message fort sera ainsi envoyé aux pays, à savoir qu'ils doivent agir pour combler les lacunes importantes en matière d'observation des systèmes climatiques. Il souligne que l'observation de l'océan en Antarctique, où le réchauffement de l'océan est l'un des facteurs potentiels de l'effondrement des blocs de glace, constitue une lacune considérable. Les données actuelles ne suffisent pas pour évaluer les risques.

M. Rea indique que l'OMM a présenté à la COP27 ses propositions visant à établir une infrastructure de mesure des niveaux de GES. Les émissions d'origine humaine de GES, en majorité du dioxyde de carbone, du méthane et du protoxyde d'azote, sont les facteurs principaux du réchauffement climatique. L'Accord de Paris adopté en 2015 pour répondre à cette urgence a pour objectif de limiter la hausse mondiale des températures à un niveau inférieur à 2,0 °C (ou, mieux encore, inférieur à 1,5° C) en réduisant les émissions de GES. Il ne s'agit pas d'une simple proposition facile à mettre en œuvre : le climat ne dépend pas de la quantité de carbone d'origine humaine dans l'atmosphère mais bien de la quantité totale présente dans l'air à un moment donné. Obtenir une atténuation efficace de leurs effets nécessite de surveiller et de comprendre tous les flux de GES, aussi bien d'origine humaine que naturelle. La prise en considération de ces flux présente un niveau d'incertitude élevé et leur méthode de mesure doit être améliorée. Pour améliorer la connaissances des cycles des GES, l'OMM suggère d'adopter la même approche que pour les prévisions météorologiques et la surveillance du climat car elle s'est révélée fructueuse. Elle propose de mettre en œuvre un système mondial intégré d'observation des GES qui ferait partie du SMISO et de diffuser en temps réel à l'échelle internationale toutes les observations de GES, qu'elles proviennent des satellites ou du sol. Des prévisions et des assimilations à partir des données des GES seront réalisées en continu pour convertir les observations en des estimations globales et cohérentes de la concentration et des flux de GES. Un cadre

reste à élaborer pour permettre des comparaisons directes et une vérification indépendante des résultats du modèle afin d'assurer la confiance dans ces derniers.

M. Rea souligne la coopération entre l'OMM et le BIPM. L'OMM est signataire du CIPM MRA depuis le 1er avril 2010 et dispose de trois laboratoires désignés : le laboratoire fédéral suisse d'essais des matériaux et de recherche (EMPA), les *Earth System Research Laboratories* de l'Administration nationale américaine des océans et de l'atmosphère (NOAA/ESRL) et l'observatoire physico-météorologique de Davos et Centre mondial du rayonnement (PMOD/WRC). Ces laboratoires désignés participent à cinq comparaisons. Trois conférences ont été coorganisées par le BIPM et l'OMM en 2010, 2015 et 2022. L'OMM participe au Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) et au Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie (CCQM). Les équipes d'experts de l'OMM incluent un certain nombre de membres issus des laboratoires nationaux de métrologie, dont certains président leur équipe ; toutefois, une plus grande collaboration dans ce domaine reste souhaitable.

M. Rea revient sur l'atelier sur le rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique (*Metrology for climate action*) organisé par le BIPM et l'OMM du 26 au 30 septembre 2022. L'atelier portait sur deux thèmes : la métrologie au service des facteurs physiques du changement climatique et des observations en matière de climat ; et la métrologie comme composante essentielle des systèmes opérationnels d'estimation des émissions de GES à partir de mesures et d'analyses précises. Avec 1 078 participants, l'atelier a permis d'aboutir à 145 projets de recommandations : 99 concernent le premier thème et 46 le second. Ces recommandations sont autant de possibilités futures de collaboration entre l'OMM et le BIPM. M. Rea précise certains domaines dans lesquels l'OMM, le BIPM et les laboratoires nationaux de métrologie pourraient être amenés à travailler et à collaborer à partir des projets de recommandations.

Un vocabulaire normalisé en matière de métrologie est indispensable pour améliorer la collaboration et l'interopérabilité entre les différents secteurs de la lutte contre le changement climatique. Ce sujet a déjà été qualifié d'important au cours de l'atelier BIPM-OMM de 2010 et cela a de nouveau été le cas lors de l'atelier de 2022 concernant la plupart des thématiques abordées. Lors de sa réunion d'octobre 2022, la Commission des observations, des infrastructures et des systèmes d'information de l'OMM (INFCOM) a convenu de la nécessité de rédiger un vocabulaire normalisé de l'OMM qui tienne compte des terminologies déjà normalisées comme celle du VIM. L'élaboration de ce vocabulaire exige une étroite collaboration entre les experts du BIPM, des laboratoires nationaux de métrologie et de l'OMM. Une collaboration avec d'autres organisations, tel l'*Open Geospatial Consortium*, sera également nécessaire. L'INFCOM a mis en place une équipe pour élaborer du matériel de formation sur les principes de la métrologie. Les contributions d'experts du domaine de la métrologie seraient les bienvenues. L'OMM met également au point des documents d'orientation sur la traçabilité de mesure concernant de nouvelles VCE et met à jour ses documents d'orientation existants pour intégrer les méthodes de mesure innovantes.

Certaines mesures réalisées au sol ou depuis l'espace exigent l'élaboration de nouvelles méthodes de calcul de l'incertitude. Il est fréquent que les écarts entre les mesures au sol et depuis l'espace ne trouvent pas d'explication, même dans le cas d'équipements très bien caractérisés du point de vue métrologique. Déterminer l'impact de la localisation d'un équipement sur le bilan d'incertitude des mesures associées demande un travail supplémentaire. La localisation d'un instrument compte pour une partie considérable, voire la majeure partie du bilan d'incertitude, plus encore que la méthode de mesure employée. La traçabilité des mesures liées à la vapeur d'eau, comme les comparaisons de radiosondes, ou encore la traçabilité des mesures de la concentration en ozone, exigent une collaboration plus étroite entre l'OMM et la communauté de la métrologie. À l'avenir, les travaux liés à l'initiative sur les gaz à effet de serre vont impliquer une extension du réseau de Veille de l'atmosphère globale et une poursuite de la collaboration entre l'OMM,

le BIPM et les laboratoires nationaux de métrologie. Cela permettra en outre d'avoir une meilleure connaissance des biais et des facteurs d'incertitude à l'œuvre dans les observations et les données des GES.

M. Rea rappelle la solidité du partenariat qui unit déjà le BIPM et l'OMM et souligne à nouveau combien les mesures sous-tendent toutes les activités menées par l'OMM. Il est possible de renforcer la collaboration entre le BIPM et l'OMM au niveau international et l'OMM compte travailler avec ses Membres pour tisser les liens requis au niveau national. L'atelier *Metrology for climate action* a plaidé pour un engagement plus important des métrologistes des laboratoires nationaux de métrologie au sein des équipes d'experts de l'OMM, en général créées pour une durée de 4 ans. Cet appel à participation lancé aux experts intervient en général avant la création des équipes d'experts : ainsi, le BIPM peut nommer des experts pour qu'ils contribuent au travail des équipes.

Le président remercie M. Réa pour sa présentation.

14. Rapport du président du CCQM

M. Sang-Ryoul Park, président du Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie (CCQM), présente son rapport sur les activités du CCQM depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCQM

M. Sang-Ryoul Park a assumé les fonctions de président du CCQM à compter de la 25e réunion plénière du CCQM (11-12 avril 2019), succédant à M. Willie E. May qui était président depuis la 19e réunion du CCQM (18-19 avril 2013). En raison des restrictions de déplacement dues à la pandémie de Covid-19, les réunions du CCQM et de ses groupes de travail se sont tenues en ligne en 2020, 2021 et 2022. Le siège du BIPM a organisé et hébergé 194 réunions en ligne pour le CCQM et ses groupes de travail, dont les 26e et 27e réunions plénières du CCQM.

La révision de la stratégie du CCQM a débuté en octobre 2019 : une fois présentés au CCQM lors de sa 26e réunion, les versions approuvées de la stratégie ainsi que des plans stratégiques pour chacun des groupes de travail pour 2021-2030 ont été publiés le 21 juin 2021.

Le CCQM a réagi rapidement afin de soutenir les activités métrologiques mises en place par les laboratoires nationaux de métrologie pour répondre à la pandémie de SARS-CoV-2. Le CCQM a ainsi lancé une étude pilote, CCQM-P216, sur la quantification des anticorps monoclonaux du SARS-CoV-2 dans une solution (coordonnée par le NIM, le CNRC et le BIPM) et une autre étude pilote, CCQM P199b, sur la quantification du nombre de copies d'ARN du SARS-CoV-2 (coordonnée par LGC, le NIM, le NIBSC et le NIST). Tout au long de 2020 et 2021, le CCQM a organisé une série de webinaires, hébergés par le BIPM, afin de coopérer avec des parties prenantes expertes et discuter des actions requises pour assurer la fiabilité des mesures dans le contexte de la pandémie de Covid-19. L'atelier en ligne du CCQM « A roadmap for metrology of infectious disease and future pandemic readiness », hébergé par le BIPM, a été organisé du 5 au 7 octobre 2021 : il a conduit à la publication le 5 septembre 2022 d'une feuille de route sur les initiatives métrologiques à mettre en place pour être en mesure de faire face à une pandémie infectieuse (« CCQM roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response »). La mise en œuvre des recommandations formulées dans le rapport sera supervisée par un groupe spécifique du CCQM jusque fin 2023 : il s'agira notamment de développer et mettre en place des comparaisons de type « exercice incendie », visant à soutenir le déploiement rapide de matériaux de référence équivalents dans le monde entier en cas de pandémie, et de créer des modules d'apprentissage en ligne.

La stratégie du CCQM a défini l'implication des parties prenantes comme un outil clé de la promotion des activités du CCQM et de leur impact : elle fournit une approche plus structurée pour favoriser l'implication des parties prenantes, notamment par l'organisation d'ateliers et webinaires et l'établissement de groupes spécifiques. Suite à la recommandation du CCQM en 2020 sur la nouvelle valeur recommandée de la section efficace d'absorption de l'ozone, un groupe spécifique a été créé au sein du Groupe de travail du CCQM sur l'analyse des gaz avec pour responsabilité la mise en œuvre de la nouvelle valeur. Ce groupe spécifique travaille activement avec les parties prenantes pour organiser de façon structurée la transition vers la nouvelle valeur de référence. En 2021, un groupe de travail pour la mise en place de comparaisons d'échelles pour les mesures de gaz à effet de serre a également été créé au sein du Groupe de travail sur l'analyse des gaz afin de développer des protocoles et des directives sur les étalons de CO_2 dans l'air et répondre aux besoins de la communauté de surveillance des émissions de gaz à effet de serre. À la suite de l'atelier du CCQM sur la métrologie des microplastiques en 2022, un groupe spécifique a été créé afin d'élaborer des propositions en consultant les parties prenantes sur un programme d'activités qui pourrait être mis en œuvre par le CCQM.

Les comparaisons organisées par le CCQM afin de soutenir les 6 300 aptitudes en matière de mesure et d'étalonnage dans les domaines de la chimie et de la biologie ont continué, avec 50 nouvelles comparaisons et la publication de 47 rapports finaux de comparaison.

Le CCQM a organisé une série d'ateliers en ligne ayant pour objectif d'impliquer les parties prenantes dans la compréhension et la définition des défis métrologiques dans de nouveaux domaines émergents tels que la métrologie des microplastiques, la métrologie des particules, la métrologie des systèmes viraux comme outils métrologiques, l'utilisation de la spectrométrie de masse dans la métrologie des radionucléides (en coopération avec le CCRI), la métrologie des grandeurs dont la valeur peut être déterminée par comptage (en coopération avec le CCU).

Domaine de compétence du CCQM

Le CCQM a pour mission de développer, améliorer et documenter l'équivalence des étalons nationaux (matériaux et méthodes de référence certifiés) pour les mesures en chimie et en biologie. Il conseille le CIPM sur les sujets relatifs aux mesures en chimie et en biologie, ainsi que sur les activités scientifiques du BIPM.

Les responsabilités du CCQM sont les suivantes :

a. établir la comparabilité mondiale des mesures en promouvant leur traçabilité au SI et, lorsque la traçabilité au SI n'est pas encore réalisable, à des références acceptées au niveau international,
b. contribuer à l'établissement d'un système reconnu au niveau international d'étalons de mesure, de méthodes et d'équipements nationaux pour les mesures en chimie et biologie,
c. participer à la mise en œuvre et au fonctionnement du CIPM MRA concernant les mesures chimiques et biologiques,
d. examiner les incertitudes des services de mesure et d'étalonnage du BIPM, publiées sur le site internet du BIPM, et conseiller le CIPM en la matière,
e. servir de forum d'échange d'informations sur les programmes de services en recherche et métrologie, ainsi que sur d'autres activités techniques, des membres du CCQM et de ses observateurs, ce qui permet d'établir de nouvelles possibilités de collaboration.

Stratégie

La stratégie du CCQM pour la période 2021-2030, publiée le 21 juin 2021, décrit les activités qui seront menées par les groupes de travail techniques du CCQM au cours de cette période. Le document définit la stratégie pour 2021-2030 afin que le CCQM exécute sa mission qui est de faire progresser la comparabilité mondiale des étalons et aptitudes de mesure en chimie et biologie, et donc de permettre aux États Membres et Associés de réaliser des mesures en toute confiance. Ainsi, la science de la mesure progressera et l'implication des parties prenantes en sera renforcée. Lors de l'élaboration de la stratégie, les groupes d'experts du CCQM ont identifié neuf domaines clés qui devraient jouer un rôle moteur dans l'évolution des services des laboratoires nationaux de métrologie et des laboratoires désignés au cours de 2021-2030 et qui devraient avoir un impact sur les activités du CCQM permettant d'assurer la comparabilité mondiale des mesures en chimie et biologie. Les défis scientifiques, économiques et sociaux que la métrologie, notamment au niveau du CCQM, peut contribuer à relever, sont décrits pour les domaines suivants : environnement et climat ; santé et sciences de la vie ; sécurité alimentaire, commerce et authentification de marchandises alimentaires ; métrologie légale ; métrologie fondamentale et promotion du SI ; médecine légale et antidopage ; fabrication de pointe ; biotechnologie et découverte de médicaments.

Le CCQM s'est fixé sept objectifs stratégiques pour la période 2021-2030, parmi lesquels : contribuer à relever les défis mondiaux ; promouvoir la réalisation de mesures chimiques et biologiques traçables métrologiquement ; faire progresser l'état de l'art de la métrologie en chimie et biologie ; améliorer l'efficience et l'efficacité du système mondial de comparaison des étalons de mesure en chimie et biologie que le CCQM conduit ; continuer à faire évoluer les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) afin de répondre aux besoins des parties prenantes ; soutenir le développement de capacités au sein des laboratoires nationaux et désignés impliqués dans de nouvelles activités ; maintenir la vitalité organisationnelle du CCQM, l'examiner de façon régulière et, si besoin, mettre à jour la structure du CCQM pour que le comité puisse exécuter sa mission.

Concernant l'objectif de faire progresser l'état de l'art, il est prévu dans la stratégie que les neuf domaines scientifiques techniques couverts par le CCQM y prennent part : analyse organique, analyse inorganique, analyse des gaz, ratios isotopiques, analyse de surface, analyse électrochimique, analyse des protéines, analyse de l'acide nucléique et analyse cellulaire. Trente-trois activités où des progrès sont attendus ont été identifiées : elles vont du soutien apporté au développement de nouveaux étalons de mesure en matière de gaz à effet de serre, de ratios isotopiques et de microplastiques jusqu'au développement de systèmes de mesure de référence pour les biomarqueurs, la composition chimique de surface, la quantification d'ARN, l'authentification d'aliments et le comptage cellulaire.

La nouvelle stratégie intègre une approche plus structurée concernant l'implication des parties prenantes, cette dernière étant considérée comme un outil clé de la promotion des activités et de l'impact du CCQM et de la communauté de la métrologie en chimie et biologie en général. Un plan à moyen et long terme concernant l'implication des parties prenantes sera élaboré et comprendra notamment : une possible extension de la participation au CCQM en tant qu'organisme de liaison, afin de mieux représenter la couverture technique accrue du comité ; des collaborations élargies avec d'autres Comités consultatifs et avec certains forums sectoriels spécifiques créés par le CIPM ; ainsi que le recours à des groupes spécifiques ou à des groupes d'étude afin de remplir la mission du CCQM.

La stratégie fondée sur les compétences fondamentales en matière de comparaisons et aptitudes sera poursuivie, l'objectif étant de ne pas accroître l'ensemble des ressources nécessaires aux comparaisons effectuées par 71 laboratoires dans le monde entier afin de maintenir près de 6 300 CMCs en chimie et biologie. Des modèles de CMCs à large portée continueront à être développés afin de faciliter leur plus large mise en œuvre tout en répondant aux besoins des parties prenantes et en réduisant éventuellement les ressources requises pour examiner et maintenir les CMCs.

Le CCQM et les organisations régionales de métrologie maintiendront des liens étroits, en continuant à coordonner les comparaisons de liaison, satellites et supplémentaires, et en mettant davantage l'accent sur le renforcement des capacités et le transfert des connaissances, notamment par le lancement de programmes de mentorat pour les laboratoires nationaux de métrologie qui coordonnent des comparaisons pour la première fois.

La mise en œuvre de la stratégie est soutenue par le Département de la chimie du BIPM qui met à disposition le secrétaire exécutif du CCQM, la coordination des comparaisons dans les domaines techniques identifiés comme prioritaires par le CCQM, les programmes de transfert des connaissances concernant le travail de laboratoire pour les laboratoires nationaux de métrologie dont le système métrologique est émergent, la base de données du JCTLM, et qui favorise l'implication des communautés de parties prenantes.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Changement de président, fonctionnement et réunions du CCQM

M. Sang-Ryoul Park a assumé les fonctions de président du CCQM à compter de la 25e réunion plénière du CCQM (11-12 avril 2019), succédant à M. Willie E. May qui était président depuis la 19e réunion du CCQM (18-19 avril 2013). Suite à l'adoption d'un mandat fixe pour la présidence et vice-présidence des groupes de travail du CCQM, de nouveaux présidents et vice-présidents ont été nommés pour la période 2019-2023 lors de la 25e réunion plénière du CCQM.

La 25e réunion plénière du CCQM s'est tenue au siège du BIPM, à la suite d'un atelier du CCQM sur les avancées de la métrologie en chimie et biologie, qui a marqué les 25 ans du CCQM et qui a fait l'objet d'un numéro spécial de *Metrologia*.

En raison des restrictions de déplacement dues à la pandémie de Covid-19, les réunions du CCQM et de ses groupes de travail se sont tenues en ligne en 2020, 2021 et 2022 ; la première réunion d'un groupe de travail organisée sur le site du BIPM a eu lieu en octobre 2022. Le siège du BIPM a organisé et hébergé 194 réunions en ligne pour le CCQM et ses groupes de travail, dont les 26e et 27e réunions plénières du CCQM.

Publication de la stratégie du CCQM pour 2021-2030

La révision du document de stratégie du CCQM a été initiée lors de la réunion du Groupe de travail du CCQM sur la stratégie en octobre 2019. Une nouvelle déclaration concernant la vision et la mission du CCQM ainsi que sept objectifs stratégiques pour 2021-2030 ont été élaborés et approuvés par le CCQM. En 2020, les neuf groupes de travail techniques du CCQM ont débuté un examen stratégique de leurs activités et de leurs projets pour 2021-2030. La stratégie et les plans de chacun des groupes de travail ont été présentés au CCQM lors de sa 26e réunion puis, après un délai supplémentaire accordé pour commentaires, les documents approuvés ont été publiés le 21 juin 2021.

Réponse du CCQM à la pandémie de Covid-19

L'importance de garantir des mesures de diagnostic fiables dans le contexte de la pandémie de Covid-19 a conduit en 2020 les laboratoires nationaux et désignés à développer des matériaux et méthodes de référence pour quantifier l'ARN viral et les anticorps monoclonaux du SARS-CoV-2. En 2020, le CCQM a également lancé deux études pilotes visant à démontrer la cohérence mondiale de ces matériaux et méthodes de référence, menées par ses groupes de travail sur l'analyse de l'acide nucléique et sur l'analyse des protéines. L'étude pilote sur la quantification de l'ARN viral du SARS-CoV-2 (CCQM-P199b), coordonnée par LGC, le NIM, le NIST et le NIBSC, a été achevée dans un délai très court de six mois. La comparaison a permis de démontrer une très bonne comparabilité qui pouvait être atteinte avec la

RT-PCR numérique (réaction en chaîne par polymérase après transcription inverse) et une méthode de référence potentielle, avec une dispersion beaucoup plus faible des résultats par rapport aux méthodes conventionnelles de laboratoire et une équivalence des résultats par rapport aux méthodes non-PCR, ce qui prouve l'exactitude que permet d'atteindre la RT-PCR numérique. La comparaison de la quantification des anticorps monoclonaux du SARS-CoV-2 (CCQM-P216), coordonnée par le NIM, le CNRC et le BIPM, a été achevée et ses résultats ont été publiés en novembre 2021. Cette comparaison est la première étude du CCQM sur une chaîne de protéines de cette taille et sur le niveau de comparabilité pouvant être atteint à l'aide de méthodes de quantification fondées sur la quantification de fragments de peptide après digestion tryptique.

En 2020 et 2021, le CCQM a organisé une série de webinaires hébergés par le BIPM afin d'impliquer les parties prenantes expertes dans les discussions sur les actions requises pour assurer la fiabilité des mesures dans le contexte de la pandémie de Covid-19. Les webinaires ont porté sur les sujets suivants : performance des laboratoires concernant les programmes d'essais d'aptitude ; performance et besoin en étalons pour les méthodes spectrométriques de masse, antigéniques et moléculaires ; performance et standardisation des méthodes d'essais à haut rendement. Lors de la 26e réunion plénière du CCQM, une session a été consacrée à la façon de faire évoluer les activités des laboratoires nationaux et désignés afin de construire une infrastructure robuste permettant d'avoir accès à des mesures fiables concernant des maladies infectieuses lors de potentielles futures pandémies. L'atelier en ligne du CCQM intitulé « A roadmap for metrology of infectious disease and future pandemic readiness », hébergé par le BIPM, s'est tenu du 5 au 7 octobre 2021 : l'objectif était d'élaborer une feuille de route pour la métrologie afin renforcer ses capacités en matière de maladies infectieuses et de définir des initiatives de préparation à une pandémie, en se fondant sur l'identification et la caractérisation des technologies de diagnostic et de pronostic appropriées, sur l'intégration et la gestion de plateformes et de données, et sur des recommandations d'actions métrologiques spécifiques qui permettraient une réponse rapide et amélioreraient le bilan clinique d'une future pandémie. De l'atelier a découlé la publication de la feuille de route « CCQM roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response » le 5 septembre 2022. La mise en œuvre des recommandations formulées dans le rapport au cours des 15 mois suivant l'atelier sera supervisée par un groupe spécifique du CCQM : il s'agira notamment de développer et mettre en place des comparaison de type « exercice incendie », visant à soutenir le déploiement rapide de matériaux de référence équivalents dans le monde entier en cas de futurs événements, ainsi qu'à mettre en place des modules d'apprentissage en ligne pour les laboratoires développant des aptitudes dans ce domaine.

Implication des parties prenantes

La stratégie du CCQM a défini l'implication des parties prenantes comme un outil clé de la promotion des activités du CCQM et de leurs impact : elle fournit une approche plus structurée pour promouvoir l'implication des parties prenantes. Ainsi, la stratégie propose d'établir un nouveau groupe spécifique du CCQM afin d'élaborer des plans à moyen et long terme concernant l'implication des parties prenantes, comprenant les activités suivantes :

- l'augmentation du nombre d'organismes de liaison participant au CCQM afin de représenter la couverture technique accrue du CCQM,
- l'interaction avec les autres comités consultatifs,
- la forte participation aux forums sectoriels spécifiques établis par le CIPM,
- le recours à des groupes spécifiques pour exécuter la mission du CCQM.

Ce nouveau groupe spécifique a été établi au cours de la 26e réunion du CCQM et a formulé huit recommandations, parmi lesquelles celle d'avoir recours aux ateliers, webinaires et groupes spécifiques au sein du CCQM pour impliquer les parties prenantes.

Le nombre de créations de groupes spécifiques au niveau du CCQM et de ses groupes de travail afin d'atteindre des objectifs bien définis avec les communautés de parties prenantes a progressé de façon substantielle. En 2020, à la suite d'un atelier du CCQM sur le sujet, le CCQM a recommandé une nouvelle valeur de la section efficace d'absorption de l'ozone, cette valeur contribuant à la surveillance des taux d'ozone dans le monde entier. Un groupe spécifique sur la mise en œuvre de la nouvelle valeur de la section efficace d'absorption de l'ozone a été créé au sein du Groupe de travail du CCQM sur l'analyse des gaz et travaille activement avec l'ensemble des parties prenantes pour procéder à une transition organisée afin d'appliquer la nouvelle valeur de référence. En 2021, un Groupe spécifique sur les comparaisons des échelles des gaz à effet de serre a été également créé au sein du Groupe de travail sur l'analyse des gaz : son objectif est de développer des protocoles et des directives sur les étalons de CO_2 dans l'air afin de répondre aux besoins de la communauté de la surveillance des émissions de gaz à effet de serre. À la suite de l'atelier du CCQM sur la métrologie des microplastiques en 2022, le CCQM a accepté de former un groupe spécifique afin de développer, après consultation des parties prenantes, des propositions sur un programme d'activités qui pourrait être mis en œuvre par le CCQM.

Métrologie pour le climat et l'environnement

Lors de sa 27e réunion, le CCQM a instauré la pratique d'inclure à ses réunions une session consacrée à un secteur en particulier, en commençant par celui du climat et de l'environnement. Dans la stratégie pour 2021-2030, six des groupes de travail techniques du CCQM ont identifié que leurs activités soutiennent ce secteur et décrivent de façon synthétique leur contribution en la matière. Ces activités, ainsi que les contributions pertinentes qui pourraient être apportées au Groupe sectoriel du CIPM sur l'environnement et le climat, ont été présentées lors de l'atelier BIPM-OMM sur le rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique organisé en septembre 2022.

Soutien aux activités du CIPM MRA

Depuis la dernière réunion de la CGPM, les comparaisons organisées par le CCQM afin de consolider les 6 300 aptitudes en matière de mesure et d'étalonnage dans les domaines de la chimie et de la biologie ont été poursuivies. Malgré l'interruption de certaines comparaisons en raison de la pandémie de Covid-19 et de la situation géopolitique, la majorité des comparaisons programmées ont pu être lancées et achevées. Le CCQM a mis en place 50 nouvelles comparaisons et a publié 47 rapports finaux de comparaison.

Lors de sa 26e réunion, le CCQM a approuvé la création d'un groupe spécifique du CCQM chargé de mettre à jour les directives concernant l'estimation de la valeur de référence d'une comparaison clé. Le groupe spécifique a pour mission de mettre à jour le document CCQM/13-22, élaboré en 2013, concernant l'estimation d'une valeur de référence d'une comparaison clé faisant consensus et des degrés d'équivalence associés, en tenant compte des nouvelles évolutions et approches, notamment concernant le concept d'« incertitude cachée ». Le groupe spécifique devrait rédiger un rapport mis à jour pour la fin de 2022.

Métrologie et santé

Le CCQM a participé à la Journée mondiale de la métrologie en 2021, dont le thème était « Mesurer pour la santé », en contribuant à l'initiative menée par le JCTLM de mettre en ligne une série de vidéos expliquant le rôle de la normalisation et de la métrologie, ainsi que l'importance de la traçabilité métrologique dans le domaine de la santé.

Relever les nouveaux défis métrologiques

Le CCQM a organisé une série d'ateliers en ligne destinés à encourager l'implication des parties prenantes : l'objectif était de définir et mieux faire comprendre aux parties prenantes les défis métrologiques dans des domaines émergents et proposer des activités que le CCQM pourrait entreprendre afin de relever ces défis. Les ateliers suivants ont été organisés, ou le seront : Métrologie des microplastiques (5-6 avril 2022) ; Métrologie des particules (25-27 octobre 2022) ; Métrologie des systèmes viraux et outils métrologiques (24-27 janvier 2023). En outre, des ateliers communs impliquant d'autres Comités consultatifs sont prévus : Atelier du CCRI et du CCQM sur l'utilisation de la spectrométrie de masse en métrologie des radionucléides : Possibilités et défis (14-16 février 2023) ; Atelier du CCU et du CCQM sur la métrologie des grandeurs dont la valeur peut être déterminée par comptage (28-30 mars 2023).

Soutien apporté par le siège du BIPM

Le travail effectué par le Département de la chimie et les programmes de métrologie en chimie au siège du BIPM continuent à soutenir les activités du CCQM tel que prévu dans la stratégie du CCQM pour 2017-2026, les activités de soutien programmées ayant été mises à jour dans la stratégie pour 2021-2030. Outre le soutien au programme de comparaisons du CCQM par la coordination de comparaisons pour les groupes de travail sur l'analyse des gaz, sur l'analyse des rapports isotopiques, sur l'analyse organique et sur l'analyse des protéines, le Département de la chimie a contribué au renforcement des aptitudes au sein des laboratoires nationaux et désignés qui développent de nouvelles activités en assurant des programmes de transfert des connaissances sous la forme de modules d'apprentissage en ligne afin de s'adapter aux restrictions imposées par la pandémie. Le passage à des réunions exclusivement en ligne pendant trois ans a été facilité par l'aide apportée par le Département de la chimie qui a organisé et hébergé 194 réunions en ligne du CCQM depuis la dernière réunion de la CGPM. Les huit ateliers en ligne du CCQM organisés depuis 2018 ont également été hébergés par le BIPM. Enfin, le Département de la chimie apporte son soutien, sur le plan technique comme organisationnel, aux trois groupes spécifiques du CCQM nouvellement créés.

Données sur le CCQM

CCQM établi en 1993

Président :	S.-R. Park
Secrétaire exécutif :	R.I. Wielgosz
Composition :	24 membres, 6 organismes de liaison et 13 observateurs
Liste des membres et observateurs :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccqm/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	11-12 avril 2019, 26-28 avril 2021, 27-29 avril 2022
Rapports complets des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccqm/publications
Onze groupes de travail :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccqm

- Analyse cellulaire
- Analyse électrochimique
- Analyse des gaz
- Analyse inorganique
- Rapports isotopiques
- Comparaisons clés et qualité des CMCs
- Analyse de l'acide nucléique
- Analyse organique
- Analyse des protéines
- Stratégie
- Analyse de surface

Un groupe de travail *ad hoc* :

- Groupe de travail *ad hoc* sur la mole

Activité en matière de comparaisons	Achevées/en cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCQM	172	12 par an
Comparaisons en continu du BIPM	1	6
Études pilotes	134	4 à 5 par an
CMCs	6 288 CMCs dans 67 catégories de service publiées dans la KCDB	

15. Métrologie et exactitude des observations satellitaires des variables climatiques

M. Donlon, directeur de la section Surface et structure interne de la Terre, rattachée à la division de la Terre et des missions scientifiques du Centre européen de recherche et de technologies spatiales (ESTEC) de l'Agence spatiale européenne (ESA), donne une présentation invitée sur la question de la métrologie et de l'exactitude des observations des variables climatiques réalisées depuis des satellites. Il indique que sa présentation donne un aperçu de la façon dont une agence spatiale envisage et traite la question de l'exactitude des mesures liées au climat et rappelle que d'autres agences effectuent des activités similaires.

Les urgences à l'échelle mondiale en matière de changement climatique et d'objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU sont nombreuses et il est essentiel de disposer de preuves scientifiques pour définir des priorités et prendre des décisions concernant le changement climatique et les ODD. L'observation de la Terre apporte des preuves sans équivoque et des données factuelles qui étayent nombre d'exemples cités dans les rapports sur le climat. Le volume important de données générées lors des observations satellitaires assoit la solidité des preuves scientifiques ainsi obtenues. Les observations menées au sol sont également importantes mais le volume de données produites est bien inférieur à celui des observations de la Terre depuis l'espace.

L'ESA supervise 82 missions à des étapes de progression différentes, dont quinze sont opérationnelles et en orbite. Chaque satellite embarque un instrument scientifique sensible qui réalise des mesures. Chaque observation de la Terre repose sur des mesures spécifiques, l'ESA a pour mission de s'assurer que chacune de ces mesures est étalonnée et entièrement traçable au SI, ce qui est particulièrement important au vu du volume de données produites. Le programme d'observation de la Terre mené par l'Union Européenne, à savoir la mission Copernicus, s'appuie sur un ensemble de satellites dédiés (de la famille Sentinelle) et de missions contributrices (satellites commerciaux et publics existants). Les satellites Sentinelle ont été conçus pour répondre aux besoins de la mission Copernicus et de ses utilisateurs. Copernicus observe l'intégralité de la surface terrestre tous les cinq jours avec une résolution de dix mètres. Les satellites Sentinelle produisant chaque jour 25 To de données, ce sont 250 To de données qui sont disséminées chaque semaine pour assurer divers services utilisés par la société.

M. Donlon donne une série d'exemples de l'évolution des besoins métrologiques dans les domaines de l'environnement et du climat pour l'Agence spatiale européenne et rappelle que l'observation du changement climatique ne répond pas aux mêmes exigences que celle de la météo. Les mesures du

changement climatique nécessitent notamment une exactitude 10 fois plus importante, par exemple 0,03 K au lieu de 0,3 K pour les températures ; elles intègrent un nombre considérable de variables supplémentaires et visent à formuler des prédictions dont l'échelle de temps se compte en décennies plutôt qu'en jours. De plus, les observations doivent rester cohérentes sur des décennies, c'est-à-dire au-delà de la durée de vie de nombreux instruments spatiaux, ce qui peut exiger l'utilisation de plusieurs satellites. Le *Committee on Earth Observation Satellites* (CEOS) et le *Global Space-based Inter-Calibration System* (GSICS) ont organisé un atelier commun nommé « *SI-Traceable Space-based Climate Observing System* » au NPL (Royaume-Uni) du 9 au 11 septembre 2019 dont a été tiré un rapport sur les exigences à remplir pour améliorer la traçabilité des observations.

M. Donlon explique que mesurer les variables climatiques essentielles (VCE) depuis l'espace revient à « prendre le pouls de la planète ». Les VCE sont des indicateurs clés de l'évolution du climat terrestre. Les chercheurs se servent de ces variables pour étudier les facteurs, les interactions et les rétroactions du changement climatique ainsi que pour estimer les réserves, les flux et les points de bascule de l'énergie, de l'eau et du carbone. Les jeux de données sur le climat produits par l'Initiative de l'ESA sur le changement climatique constituent une contribution majeure aux preuves scientifiques utilisées pour comprendre le changement climatique. Les données produites par les satellites sont un complément important par rapport aux mesures réalisées depuis le sol. Ces observations sont précieuses pour les applications régionales en ce qu'elles offrent des images multi-canaux de résolutions spatio-temporelles très élevées. Les interrogations majeures portent sur la façon de parcourir les données et de renforcer leur interopérabilité et leur gestion : la transformation numérique est un aspect important à prendre en considération pour satisfaire ces besoins.

Relever les défis mondiaux liés au climat exige une confiance dans la qualité métrologique des données : le SI joue ici un rôle crucial. Des observations fiables depuis l'espace sont nécessaires pour : surveiller et évaluer les progrès dans l'atténuation du changement climatique ; mieux comprendre la sensibilité, les dépendances et les prévisions climatiques ; et soutenir l'adaptation, la réponse à l'urgence alimentaire et les investissements dans la réduction des risques. Une prise de décision éclairée à partir d'observations s'appuie sur des données en grand nombre, exhaustives, accessibles et exploitables. Elle doit reposer sur un système mondial d'observations intégré et interopérable (au sol comme dans l'espace), sur des références robustes (étalons) à partir desquelles mesurer de façon fiable les changements sur une échelle de temps la plus courte possible et, enfin, sur une acceptation internationale. Des décisions telles que la date de construction et la taille de la prochaine barrière de la Tamise au Royaume-Uni ou encore l'amélioration des digues contre la montée du niveau de la mer aux Pays-Bas seront fondées sur des preuves scientifiques tirées de ces observations.

Le programme *Climate-Space* de l'ESA utilise les données de différentes missions satellitaires pour collecter des données de mesure des VCE et du climat. Les résultats servent de base pour aider les États Membres à atteindre les objectifs de l'accord de Paris entre les signataires de la CCNUCC, améliorent les modélisations du climat, offrent une base de référence pour la vérification des données et permettent à l'ESA de fournir une évaluation de l'état du climat à l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et au GIEC. M. Donlon rappelle que l'ESA reconnaît le rôle essentiel du SI dans la confiance apportée à l'exactitude et la comparabilité mondiale des mesures nécessaires à la protection de l'environnement, aux études sur le climat de la planète et à la recherche scientifique.

M. Donlon indique que le cadre de bonnes pratiques d'assurance qualité pour l'observation de la Terre (Quality Assurance for Earth Observation - QA4EO) propose plusieurs étapes pour parvenir à un bilan d'incertitude pour les mesures de données climatiques fondamentales (fundamental data records - FDRs) ou données thématiques (thematic data products - TDPs) et pour les mesures de référence fiducielles (fiducial reference measurements - FRMs). Les cinq étapes sont les suivantes : la définition du mesurande et de la fonction de la mesure, la création d'un diagramme de traçabilité, l'évaluation de

chaque source d'incertitude et l'établissement d'une table d'effets, le calcul du produit et de son incertitude, et enfin, le stockage des informations pertinentes pour les futurs utilisateurs. Les mesures de référence sont un ensemble de mesures indépendantes, entièrement caractérisées et traçables effectuées au sol qui suivent les directives du QA4EO du GEO-CEOS (Groupe d'observation de la Terre - Comité de satellites d'observation de la Terre). Les mesures de référence fiducielles sont essentielles pour l'efficacité des observations réalisées depuis l'espace. M. Donlon illustre la traçabilité des instruments de mesure au sol en prenant l'exemple d'un radiomètre et de sa traçabilité à l'EIT-90. Il ajoute que les instruments font l'objet de comparaisons régulières et qu'il est essentiel de maintenir la traçabilité et les mesures de référence aussi bien sur le sol que dans l'espace. Les satellites qui surveillent la hausse du niveau de la mer utilisent des radars pour mesurer la profondeur des océans. Ces instruments sont en réalité des altimètres qui s'appuient sur un temps précis à la nanoseconde près pour garantir l'exactitude des mesures effectuées. Toute évolution de l'UTC sera suivie de près afin de pouvoir être mise en œuvre et appliquée sans difficultés aux instruments.

L'ESA s'assure que la traçabilité au SI soit prise en considération lors de la conception de chaque nouveau satellite comme au cours de leur construction. L'ESA a adopté la notion d'incertitude-type totale et travaille avec les constructeurs de satellites pour mettre en œuvre la caractérisation de l'étalonnage de manière adéquate et préalablement au lancement. L'étalonnage pré-lancement a été inclus dans le calcul de l'incertitude des satellites afin que les constructeurs soient responsables de l'étalonnage dans l'espace ; de cette façon, il n'existe plus de précision radiométrique absolue. En résumé, l'ESA exige que la traçabilité au SI fasse partie intégrante de la construction des satellites de l'ESA, de même que l'incertitude, afin que ces données soient fournies aux utilisateurs. M. Donlon explique que l'ESA suit l'approche du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) en matière d'incertitudes.

M. Donlon donne des détails sur la mission Sentinel-6 dédiée à la surveillance de la montée du niveau de la mer. Cette mission commune à l'ESA, EUMETSTAT, le Centre national d'études spatiales (CNES), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et l'Union Européenne a pour but de maintenir les séries temporelles de référence obtenues grâce aux altimètres embarqués par les satellites. La montée du niveau de la mer est une variable essentielle et représente une menace pour les sociétés : en effet, 680 millions de personnes dans le monde vivent en zone côtière de faible altitude et chaque montée d'1 cm du niveau de la mer expose 3 millions de personnes supplémentaires à un risque d'inondation. Le suivi de la montée du niveau de la mer au fil du temps s'effectue à l'aide d'observations de différents satellites. Afin d'assurer une transition lisse entre les satellites, il est nécessaire de les faire voler très près l'un de l'autre pendant 12 mois. Selon M. Donlon, on pourrait considérer cet intervalle de temps comme une opportunité gâchée et préférer effectuer des mesures avec des satellites plus éloignés afin d'améliorer l'échantillonnage et la dispersion géographiques. Toutefois, la mesure de la hausse du niveau de la mer exige une passation optimale entre un satellite et son remplaçant, comme c'est le cas aujourd'hui. Par exemple, Sentinel-6 et Jason-3 ont effectué un vol en tandem à 220 km d'écart sur 12 mois afin d'assurer en continu la mesure de l'évolution sur 30 ans du niveau moyen de la mer sur la planète.

M. Donlon présente dans le détail la mission TRUTHS, en cours de préparation, qui fait partie de la mission EarthWatch de l'ESA. TRUTHS (*Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial- and Helio-Studies*) est un laboratoire spatial d'étalons et représente un « étalon-or » de l'urgence climatique. Mission opérationnelle en matière de climat, TRUTHS doit permettre de réaliser des mesures-étalon de l'état du climat afin d'établir une estimation du bilan des rayonnements terrestres tout en s'assurant de la création d'un « étalon-or » utilisable pour étalonner plusieurs missions à la fois dans les spectres du visible et de l'infrarouge court. La mission offrira également une traçabilité des mesures effectuées dans l'espace au SI pour la première fois. Une mesure-étalon est une mesure dotée de caractéristiques

(documentation, incertitude traçable au SI, échantillon représentatif) qui lui valent d'être considérée sans équivoque comme une « référence » pour un mesurande particulier et à laquelle les futures mesures du même mesurande peuvent être comparées.

M. Donlon résume son intervention et rappelle que les données de mesures climatiques sont au cœur du travail de l'ESA, qui s'engage à mettre en œuvre le programme *Climate-Space*. La métrologie est nécessaire en raison du volume significatif de données produites dans l'espace : des erreurs minimes peuvent entraîner des conséquences majeures sur les séries temporelles des mesures du climat. M. Donlon remarque que la quasi-totalité des relevés effectués dans les hautes latitudes de la planète sont obtenus grâce à des observations depuis l'espace : les changements observés dans l'Arctique l'ont été depuis l'espace à l'aide de données de très bonne qualité. L'ESA intègre la métrologie (incertitude et traçabilité) à l'ensemble de ses processus scientifiques et d'ingénierie des satellites : conception de satellites et traitement des données, validation à l'aide des mesures de référence fiducielles (FRMs), constellations en orbite utilisant le vol en tandem, nouvelles missions de satellites traçables au SI et dédiées à cette traçabilité (TRUTHS par exemple) et mise en œuvre des méthodes de modélisation de l'incertitude de QA4EO. L'ESA reconnaît le rôle essentiel joué par le SI pour améliorer la confiance dans l'exactitude et dans la comparabilité mondiale des mesures nécessaires à la protection de l'environnement, à l'étude du climat de la planète et à la recherche scientifique.

Le président remercie M. Donlon et demande s'il y a des questions.

M. Wielgosz demande à M. Donlon des détails sur le programme de l'ESA de surveillance des gaz à effets de serre depuis l'espace. M. Donlon répond que l'ESA prévoit une mission nommée *Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring* (CO2M) qui doit faire partie de la série de missions amirales Copernicus et qui sera lancée dans les années à venir. Les satellites voleront en constellation pour effectuer des mesures locales des émissions de CO_2. Les mesures seront disponibles 24 heures après la mesure et seront au cœur d'un système de surveillance des taux de CO_2. M. Donlon ajoute que les mesures de CO_2 ne doivent pas être étudiées hors de leur contexte : connaître le taux de CO_2 seul est important mais il est nécessaire de savoir comment utiliser cette information. Il s'agit notamment de déterminer où va le CO_2, quelle quantité atteint l'océan et comment, où se situe le puits de carbone océanique, et s'il existe une dépendance à la température et une fugacité dans la couche de surface. Les mesures de la température de la surface de la mer, des vagues des océans, de leur rugosité et des vents, effectuées depuis l'espace, sont autant d'observations complémentaires qui, mises ensemble, aident à progresser dans la bonne direction pour comprendre les problèmes auxquels nous sommes confrontés tout en offrant des mesures fondamentales pour modéliser le climat à l'échelle mondiale.

16. Rapport de la présidente du CCPR

Mme Maria Luisa Rastello, présidente du Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), présente son rapport sur les activités du CCPR depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCPR

Établi sous le nom de Comité consultatif de photométrie en 1933 puis étendu au domaine de la radiométrie en 1971, le CCPR est désormais responsable de la métrologie dans le domaine des rayonnements optiques – des mesures bien établies aux domaines de recherche très avancés. De 1997 à 2005, le CCPR a créé trois groupes de travail responsables de sujets spécifiques indiqués dans leur nom : le Groupe de travail sur la stratégie, le Groupe de travail sur les comparaisons clés et le Groupe de travail sur les aptitudes en matière de mesure et d'étalonnage. Chacun de ces groupes de travail

dispose de plusieurs sous-groupes et forums de discussion qui ne sont pas permanents mais traitent de besoins métrologiques spécifiques ou de sujets d'actualité.

Depuis la 26e réunion de la CGPM (2018), le CCPR a contribué à :

- finaliser des documents clés concernant la définition de la candela et sa mise en pratique,
- définir un objectif stratégique à long terme de mise en place d'un système photométrique scientifiquement rigoureux fondé sur les sensibilités spectrales des cônes afin d'établir un nouveau lien entre les grandeurs photométriques et radiométriques,
- adopter une approche fondée sur l'analyse des risques pour examiner les exigences et donner des directives concernant la portée des comparaisons clés en termes de soutien aux CMCs, en intégrant des graphiques et des listes de contrôles afin de s'assurer que toutes les exigences sont clairement identifiées et d'aider ceux qui procèdent à l'examen des CMCs.

Domaine de compétence du CCPR

Les responsabilités du CCPR sont les suivantes :

- conseiller le CIPM sur tous les sujets liés à la photométrie et à la radiométrie,
- établir la comparabilité mondiale des mesures en photométrie et radiométrie en promouvant la traçabilité à l'unité photométrique du SI, la candela, et à ses unités dérivées pour les grandeurs photométriques et radiométriques,
- contribuer à l'établissement d'un système d'étalons de mesure nationaux reconnu au niveau international pour la photométrie et la radiométrie et au développement de méthodes et équipements radiométriques absolus,
- participer à la mise en œuvre et au fonctionnement du CIPM MRA en ce qui concerne la photométrie et la radiométrie,
- examiner les incertitudes des aptitudes en matière de mesure et d'étalonnage pour la photométrie et la radiométrie, publiées sur le site internet du BIPM, et conseiller le CIPM en la matière,
- servir de forum d'échange d'informations sur les activités photométriques et radiométriques des membres et observateurs du CCPR,
- établir de nouvelles possibilités de collaboration en photométrie et radiométrie.

Stratégie

La stratégie développée par les membres du CCPR afin d'assumer les responsabilités précédemment mentionnées est décrite dans le document de stratégie du CCPR, qui a récemment été mis à jour afin de couvrir les années 2022 à 2032. Une synthèse de cette stratégie est donnée ci-dessous.

Les objectifs stratégiques du CCPR pour 2022-2032 sont les suivants :

- contribuer à relever les défis mondiaux en photométrie et radiométrie,
- promouvoir l'utilisation systématique de mesures radiométriques optiques et photométriques traçables métrologiquement,
- faire avancer l'état de l'art métrologique dans les domaines de la photométrie et de la radiométrie optique,
- améliorer l'efficience et l'efficacité du système mondial de comparaisons en photométrie et radiométrie optique,
- continuer à faire évoluer les aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) afin de répondre aux besoins des parties prenantes,
- maintenir la vitalité organisationnelle du CCPR, examiner de façon régulière et, si besoin, mettre à jour la structure du CCPR pour que le comité puisse exécuter sa mission.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Membres et observateurs

Deux nouveaux membres ont rejoint le CCPR en 2022 : Justervesenet (JV, Norvège) et INMETRO (Brésil), ainsi qu'un nouvel observateur : National Scientific Centre "Institute of Metrology" (NSC-IM, Ukraine). Des experts de ces trois laboratoires ont assisté à la 25e réunion du CCPR (mai 2022) afin de présenter les activités de leur laboratoire : sur recommandation du CCPR, le CIPM a approuvé lors de sa réunion de juin 2022 la participation au CCPR de ces laboratoires.

Réunions et ateliers

Depuis novembre 2018, le CCPR a tenu deux réunions plénières, l'une en septembre 2019 (au siège du BIPM à Sèvres), l'autre en mai 2022 (en ligne). Des présentations sur les avancées de la métrologie en photométrie et radiométrie ont été données lors de la réunion de 2019 mais cela n'a pas été le cas lors de la réunion en ligne de 2022, faute de temps.

Aucun atelier du CCPR n'a été organisé depuis novembre 2018 en raison de la pandémie de Covid-19. Toutefois, la conférence NEWRAD s'est tenue en ligne et un membre du CCPR a participé à l'atelier BIPM-OMM sur le rôle de la métrologie dans la lutte contre le changement climatique organisé en septembre 2022.

Conseiller le CIPM et promouvoir la traçabilité à la candela

La candela et les documents associés

Lors de la 26e réunion de la CGPM, le CCPR a présenté les résultats des révisions majeures apportées aux documents clés relatifs à la définition de la candela et à sa mise en pratique. Le document de la mise en pratique a été finalisé après la 26e réunion de la CGPM et publié officiellement en mai 2019, parallèlement à la publication de l'Annexe 3 « Unités pour la mesure des grandeurs photochimiques et photobiologiques » de la Brochure sur le SI. En outre, la publication « Principes régissant la photométrie » a été révisée en collaboration avec la Commission internationale de l'éclairage (CIE) afin d'y intégrer les fonctions d'efficacité lumineuse spectrale normalisées pour la vision mésopique (crépuscule) et d'en assurer la cohérence avec la révision du SI adoptée en 2018. Les trois sous-groupes du Groupe de travail sur la stratégie se sont chargés de ces publications puis ont été officiellement dissous au cours de la 25e réunion du CCPR (mai 2022).

Système fondé sur les sensibilités spectrales des cônes

Depuis la révision du SI mise en œuvre en 2019, le CCPR a poursuivi sa réflexion concernant la définition de la candela. Mme Rastello a donné une présentation sur les questions scientifiques clés que soulève la définition de l'unité d'intensité lumineuse, la candela, lors de la 25e réunion du CCU (2021). Il fait consensus au sein du CCPR que l'actuelle définition répond à toutes les exigences pratiques pour le commerce mondial, les sciences et la société. Toutefois, la constante K_{cd} reliant les grandeurs photométriques et radiométriques, qui n'est pas une constante fondamentale, représente un défi scientifique majeur. Du fait des progrès récents et à venir dans le domaine de la science de la vision et de l'intelligence artificielle, qui permettent de mieux comprendre la perception de la lumière à l'aide du système des sensibilités spectrales des cônes, des changements pourraient être apportés à la définition de la candela. Le CCPR s'est fixé comme objectif stratégique à long terme de mettre en place un système photométrique scientifiquement rigoureux fondé sur les sensibilités spectrales des cônes afin d'établir un nouveau lien entre les grandeurs photométriques et radiométriques. Cela pourrait avoir un impact significatif sur les appareils, fabricants, règlementations et normes de mesure fondés sur la présente définition de la candela (2018) à partir de la constante K_{cd}. Un nouveau sous-groupe a été créé lors de la 25e réunion du CCPR afin de discuter de ce sujet.

Transformation numérique

Lors de la 25e réunion du CCPR, le Groupe de travail sur la stratégie a proposé de créer un nouveau sous-groupe afin de discuter de l'impact de la transformation numérique sur les sujets sous la responsabilité du CCPR. M. Blattner présidera ce sous-groupe. Les termes de référence proposés sont de suivre les activités de transformation numérique en photométrie et radiométrie et de soutenir et coordonner la mise en œuvre du cadre numérique du SI en photométrie et radiométrie.

Assurer la comparabilité mondiale des mesures

Conformément à la politique du CCPR, les comparaisons internationales de grandeurs clés actuellement conduites par le CCPR sont des répétitions de l'ensemble des dix comparaisons effectuées lors du premier cycle. Les dix comparaisons de cycle 2 en sont à des stades d'avancement différents, le rapport final de la comparaison CCPR-K3.2014 a notamment été publié en 2022 et les mesures ont été achevées pour quatre autres comparaisons. Au cours de la réunion du CCPR de mai 2022, plusieurs membres ont notifié des retards pour certaines comparaisons dus, en premier lieu, à la fermeture de laboratoires au cours de la pandémie de Covid-19 et, en second lieu, à des restrictions de communication et de coopération entre certains pays du fait de la situation en Ukraine.

Entretemps, les organisations régionales de métrologie ont publié les rapports de cinq comparaisons afin de démontrer la comparabilité de plusieurs laboratoires, et des mesures ont commencé pour cinq autres comparaisons. Parmi elles figure la première comparaison réalisée au sein de GULFMET, GULFMET.PR-K4.2012, conduite par l'UME (Türkiye), avec le NIS (Égypte) et SASO-MNCC (Arabie saoudite) comme participants.

En outre, des comparaisons supplémentaires ont été menées au sein des organisations régionales afin d'étayer les mesures réalisées à l'aide de fibres optiques, notamment au sein de COOMET. Une comparaison sur le rayonnement solaire total a été conduite par PMOD en tant que Centre mondial du rayonnement (WCR) de l'OMM. L'instrument utilisé, un radiomètre absolu solaire cryogénique (CSAR), a été développé par le NPL (Royaume-Uni), PMOD/WRC et METAS (Suisse).

Améliorations apportées au CIPM MRA

Les efforts entrepris après la 25e réunion de la CGPM (2014) afin d'améliorer les mécanismes du CIPM MRA ont été poursuivis de 2018 à 2022, en se concentrant sur l'élaboration de directives pour rationaliser les déclarations de CMCs et leur évaluation. Cette tâche a été menée par le sous-groupe 3 du Groupe de travail sur les CMCs et a permis de rédiger de nouvelles directives dans le document CCPR-G9 « Rules for review of CMC claims and requirements for supporting evidence ». Ces nouvelles directives ont été approuvées et publiées en juin 2021. Les directives adoptent une approche fondée sur l'analyse des risques pour examiner les exigences et donner des directives concernant la portée des comparaisons clés en termes de soutien aux CMCs, en intégrant des graphiques et des listes de contrôles afin de s'assurer que toutes les exigences sont clairement identifiées et d'aider ceux qui procèdent à l'examen des CMCs. Par conséquent, le document associé « Supporting evidence for CMCs in PR » a été mis à jour afin de se conformer aux nouvelles règles.

Défis et difficultés

Les membres du CCPR ont indiqué fin 2021 que les confinements dus au Covid-19 en 2020 et 2021 avaient eu de sévères répercussions sur les travaux de recherche et avaient entraîné des retards des services d'étalonnage. Certaines collaborations internationales ont également été fortement touchées par la pandémie en raison des restrictions de déplacement et, depuis février 2022, par des restrictions de communication supplémentaires liées à la situation géopolitique. Les conséquences sur la conduite

des comparaisons clés sont gérées au cas par cas par les participants.

Perspectives à court terme et à long terme

À court terme, le CCPR se concentrera sur la réalisation du second cycle du portefeuille actuel de comparaisons clés, qui sont encore considérées comme répondant de manière appropriée aux besoins de la communauté du CCPR. Entretemps, un certain nombre d'études pilotes ont été lancées afin de mieux comprendre les futurs besoins en matière de comparaisons et afin de vérifier la faisabilité de ces comparaisons. Cinq activités ont ainsi déjà commencé avec pour but :

- d'étudier l'extension du domaine de longueurs d'onde de la comparaison clé existante CCPR-K6,
- d'étudier les lampes-étalons LED pour les comparaisons clés existantes,
- d'étudier une comparaison sur la sensibilité spectrale dans le domaine spectral des THz,
- d'étudier une comparaison sur l'efficacité de la détection des détecteurs de photons uniques,
- d'étudier une comparaison sur la sensibilité de puissance de la fibre optique à l'aide d'un radiomètre cryogénique couplé à de la fibre optique.

Après les récents progrès effectués concernant les directives d'examen des CMCs, le système sera maintenu mais aucune révision majeure ne devrait être requise au cours des cinq prochaines années. Une discussion sur le traitement mathématique des résultats de comparaison clé permettant d'établir l'équivalence (variance supplémentaire) et de déterminer son impact sur les CMCs a commencé en 2021 au sein des groupes de travail sur les comparaisons clés et sur les CMCs : elle continuera au sein des réunions et des ateliers des groupes impliqués. De façon similaire, des méthodes pour relier les comparaisons des organisations régionales de métrologie et celles du CCPR ont commencé à être étudiées en 2020 et des directives devraient être produites dans les années à venir.

Une étude exhaustive a été conduite par le sous-groupe 10 du Groupe de travail sur la stratégie afin de définir les besoins et attentes des membres du CCPR sur tous les sujets couverts par le CCPR en matière de photométrie et de radiométrie. Alors que les conclusions de cette étude sont en cours d'analyse, des tendances peuvent être clairement identifiées, telle la nécessité d'organiser des ateliers, de créer de nouveaux sous-groupes, et de lancer des études pilotes dans des domaines intéressant particulièrement les membres du CCPR, comme les étalons fondés sur des LED, la métrologie des UV, la métrologie à faible flux de photons, les étalons photovoltaïques, les propriétés optiques des matériaux, les observations du climat et de l'environnement.

Un atelier sur le système fondé sur les sensibilités spectrales des cônes et son impact sur les futures mesures en photométrie et radiométrie est déjà programmé pour la prochaine réunion du CCPR en 2024, ce qui démontre le grand intérêt des membres du CCPR vis-à-vis de ce domaine dans lequel la CIE est également impliquée. Les activités liées sont encore considérées comme de la recherche mais les évolutions seront supervisées afin de préparer les systèmes de mesure à d'éventuels importants changements. De façon similaire, le nouveau sous-groupe sur la transformation numérique constituera un forum pour discuter de la manière dont la transformation numérique impactera le travail du CCPR, en tenant compte des possibilités de rendre les documents sous la responsabilité du CCPR lisibles par machine ou d'interroger la KCDB avec des APIs dédiées, et d'automatiser le travail associé des membres du CCPR.

Données sur le CCPR

CCPR établi en 1933

Présidente :	M.L. Rastello
Secrétaire exécutive :	J. Viallon
Composition :	25 membres, 2 organismes de liaison et 4 observateurs
Liste des membres et observateurs :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccpr/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	19-20 septembre 2019, 10-11 mai 2022
Rapports complets des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccpr/publications
Trois groupes de travail :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccpr

- Comparaisons
- CMCs
- Stratégie

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmées [période]
Comparaisons clés du CCPR (et comparaisons supplémentaires)	12 comparaisons clés, 3 supplémentaires, 3 avant le MRA, 1 répétition, 4 bilatérales	4 comparaisons clés	4 comparaisons clés [2022-2026]
Comparaisons du BIPM	3	0	0
Études pilotes	3	2	3
CMCs	1 345 CMCs dans 85 catégories de service publiées dans la KCDB		

Le président du CIPM remercie Mme Rastello pour son rapport.

17. Rapport du président du CCT

M. Yuning Duan, président du Comité consultatif de thermométrie (CCT), présente son rapport sur les activités du CCT depuis la 26e réunion de la CGPM (2018). Ce rapport a été préparé avec l'aide de Graham Machin, *Senior Fellow* du National Physical Laboratory (Royaume-Uni) et président du Groupe de travail du CCT sur la thermométrie sans contact.

Résumé

Le CCT est responsable de la métrologie dans les domaines de la température, de l'humidité et des grandeurs thermophysiques[4].

Il est essentiel de connaître avec exactitude la température et d'autres grandeurs apparentées dans de nombreux domaines des sciences, de la technologie et de l'industrie. Ainsi :

[4] Les grandeurs thermophysiques décrivent le comportement thermique de la matière : il s'agit par exemple de la conductivité thermique ou de l'isolation thermique.

- la température est un paramètre de contrôle clé dans l'industrie : une mesure fiable de la température est inextricablement liée à l'efficacité énergétique et à la qualité du produit final ;
- la métrologie de la température et de l'humidité joue un rôle important dans les études sur le climat ;
- les mesures fiables de grandeurs thermophysiques fournissent des données essentielles qui permettent de quantifier, par exemple, les performances d'isolation thermique.

Depuis la 26e réunion de la CGPM (2018), le CCT s'est attaché à réaliser et disséminer le kelvin redéfini, en se concentrant sur l'amélioration des mesures liées au climat et en participant à l'amélioration de la thermométrie clinique pendant la pandémie de Covid-19. La stratégie du CCT a connu une révision majeure en 2021 : elle est désormais parfaitement en phase avec la stratégie du CIPM « CIPM strategy 2030+: responding to evolving needs in metrology ». Le CCT doit relever de nouveaux défis de taille, notamment la manière de conduire des comparaisons clés de température thermodynamique et de mettre en œuvre la transformation numérique, en particulier par la validation d'approches assurant une traçabilité *in situ* au kelvin (dans le cas par exemple de la thermométrie primaire pratique).

Domaine de compétence du CCT

Le CCT conseille le CIPM sur tous les sujets scientifiques qui présentent de l'intérêt pour la métrologie de la température, de l'humidité et des grandeurs thermophysiques. Il sert par ailleurs de référence et de réseau à la communauté diversifiée de la thermométrie afin de fixer des objectifs communs et de faciliter la collaboration entre les laboratoires nationaux de métrologie et les laboratoires désignés des États Membres ou d'autres organismes pertinents. Le CCT maintient l'infrastructure mondiale de mesure de la thermométrie en promouvant et en étayant l'échelle internationale de température de 1990, et en établissant des bonnes pratiques pour la thermométrie et les grandeurs apparentées. Il identifie et organise des comparaisons clés dans les domaines qu'il couvre afin d'assurer la comparabilité mondiale des mesures et leur traçabilité au SI, ce qui garantit la qualité des données fournies. Il encourage également la recherche sur la réalisation et la dissémination du kelvin au sein des laboratoires nationaux et soutient l'infrastructure de mesure afin de relever les défis mondiaux tels que le changement climatique et les pandémies.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Le CCT et la redéfinition du kelvin

Jusqu'en mai 2019, le kelvin était défini par la température du point triple de l'eau, à savoir la température où la glace, l'eau et la vapeur d'eau coexistent. Des améliorations progressives ont été apportées à la réalisation du kelvin, notamment en appliquant des corrections relatives à l'influence de la composition isotopique de l'eau. Toutefois, en mai 2019, le kelvin ainsi que l'ampère, le kilogramme et la mole ont été redéfinis à partir de valeurs fixées de constantes fondamentales.

La redéfinition du kelvin à partir de la constante de Boltzmann a été un objectif clé du CCT et ce dernier a joué un rôle majeur dans la coordination du travail nécessaire pour pouvoir redéfinir le kelvin avec succès. Un grand nombre de laboratoires de métrologie utilisant différentes techniques et réalisations ont déterminé la constante de Boltzmann k avec une faible incertitude. Quatre principales approches ont été étudiées : la vitesse du son dans de l'argon ou de l'hélium (thermométrie acoustique à gaz, AGT), une méthode fondée sur la capacité à l'aide de la constante diélectrique de l'hélium (thermométrie à gaz par mesure de la constante diélectrique, DCGT), le bruit électrique (Johnson) dans une résistance (thermométrie à bruit thermique, JNT) et la largeur Doppler d'une raie spectrale (thermométrie par mesure de la largeur Doppler, DBT).

La collaboration internationale des laboratoires impliqués a été indispensable pour avoir une meilleure vision des résultats et, en particulier, pour mieux comprendre les composantes d'incertitude provenant d'effets systématiques. Les critères d'acceptation fixés pour la constante de Boltzmann (Recommandation T1 du CCT (2014) sur la nouvelle définition du kelvin), à savoir

- une incertitude-type relative de la valeur ajustée de k inférieure à 1×10^{-6}, et
- une détermination de k fondée sur au moins deux méthodes fondamentalement distinctes qui permettent d'obtenir, chacune, au moins un résultat présentant une incertitude-type relative inférieure à 3×10^{-6},

ont été dépassés étant donné que les méthodes AGT, DCGT et JNT ont présenté des incertitudes suffisamment faibles pour être intégrées à la valeur de consensus de la constante de Boltzmann. Les critères fixés ont garanti qu'il n'y avait pas de différence perceptible de température entre l'ancienne et la nouvelle définition du kelvin. L'ajustement spécial de CODATA de 2017 a fourni la valeur exacte :

$$\boldsymbol{k = 1{,}380\,649\ 10^{-23}\ \text{J/K}}$$

En prévision de la nouvelle définition du kelvin, la mise en pratique[5], qui est un document donnant aux utilisateurs des directives concernant la réalisation pratique (en laboratoire) de la définition du kelvin fondée sur k, a été révisée. Elle comporte les éléments suivants : la définition du kelvin, la définition des termes liés à la thermométrie primaire, les critères d'inclusion d'une méthode thermodynamique, un aperçu des méthodes de thermométrie primaire de réalisation du kelvin à partir des lois fondamentales de la physique [thermométrie acoustique à gaz, radiométrie, thermométrie à gaz par mesure de la constante diélectrique, thermométrie à gaz par mesure de l'effet de réfraction, thermométrie à bruit thermique] et la description des échelles de température définies, EIT-90 et PLTS-2000. Cette mise en pratique n'est pas seulement un guide : elle représente le statut actuel de la métrologie des température à son plus haut niveau, résumant des décennies d'expérience.

Les échelles de température EIT-90 et PLTS-2000 ne sont pas affectées par la redéfinition. Le document intitulé « Guide to the realization of the ITS-90 »[6], disponible sur le site internet du BIPM, a été mis à jour. Des guides sur la thermométrie secondaire (points fixes spécifiques et thermocouples) ont également été produits.

Parmi les publications récentes sur le sujet figurent un numéro spécial de *Metrologia* sur la constante de Boltzmann[7] en 2015, un numéro spécial de *Philosophical Transactions A* de la Royal Society (Royaume-Uni) sur la mise en œuvre de la nouvelle définition du kelvin[8] en 2016 et un article de synthèse sur le kelvin redéfini[9] en 2018.

Les différents instruments primaires développés pour déterminer la constante de Boltzmann sont désormais utilisés pour mesurer la température thermodynamique sur une large plage de températures afin de déterminer la différence par rapport à l'échelle de température actuelle, l'EIT-90. Cette phase devrait durer jusqu'en 2025 voire 2030. Il en résultera une réévaluation de T-T_{90}, nécessaire aux utilisateurs qui ont besoin de valeurs précises de température thermodynamique. Il n'est pas envisagé qu'une nouvelle échelle de température soit nécessaire au cours des dix prochaines années. La communauté de la thermométrie se concentre plutôt sur la façon de mettre en pratique les deux récentes recommandations du CCT :

[5] Mise en pratique de la définition du kelvin - Annexe 2 de la Brochure sur le SI (bipm.org)
[6] https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guide-its90.html
[7] http://iopscience.iop.org/journal/0026-1394/page/Focus_on_the_Boltzmann_Constant
[8] Machin, G., "Towards implementing the new kelvin", 2016, *Phil. Trans R. Soc. A.* **374**: 20150053, http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0053
[9] Machin, G., "The Kelvin redefined", 2018, *Meas. Sci. Technol.* **29** 022001 https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9ddb

- T1 (2017) qui encourage les laboratoires nationaux de métrologie des États Membres à tirer parti des possibilités de réalisation et de dissémination de la température thermodynamique qu'offrent la redéfinition du kelvin et sa mise en pratique,
- T1 (2021) qui recommande aux laboratoires nationaux de métrologie d'améliorer leur détermination de T-T_{90} au-delà de 400 K et ce faisant, de permettre la dissémination de températures thermodynamiques proches de 700 K.

Il est clair qu'à des températures supérieures à 1 300 K et inférieures à 25 K, la dissémination de la température thermodynamique est réalisable. Les travaux de recherche en cours dans les laboratoires nationaux de métrologie montreront la possibilité, à long terme, de disséminer la température thermodynamique sur une large plage de températures.

Stratégie

En 2012, le CCT a effectué une analyse approfondie de son travail depuis la mise en œuvre du CIPM MRA et a établi des prévisions concernant l'impact de ses activités. Cette analyse, mise à jour et publiée en 2017[10], constitue le plan stratégique du CCT et donne une vision globale des besoins métrologiques actuels et à venir dans le domaine des températures. La stratégie du CCT a été totalement révisée en 2021 et couvre désormais la période qui s'étend de 2021 à 2030[11]. Rompant avec la précédente formulation, la nouvelle version de la stratégie du CCT définit les intérêts des parties prenantes au plus haut niveau métrologique en faisant correspondre les priorités du CCT à la stratégie du CIPM « CIPM strategy 2030+: responding to evolving needs in metrology ». Les activités du CCT sont par nature transverses et l'élaboration de la stratégie a mis en évidence que le CCT pourrait contribuer aux sept domaines prioritaires clés identifiés dans la stratégie du CIPM, à savoir le changement climatique et l'environnement, la santé et les sciences de la vie, la sécurité alimentaire, l'énergie, la fabrication de pointe, la transformation numérique et la « nouvelle » métrologie. La stratégie du CCT et sa synthèse sont disponibles sur le site internet du BIPM[12].

Groupes de travail et sous-groupes de travail du CCT

Le CCT compte sept groupes de travail responsables des domaines suivants : thermométrie par contact ; environnement ; thermométrie sans contact ; humidité ; comparaisons clés ; CMCs ; et stratégie. Le CCT s'appuie sur un certain nombre de sous-groupes de travail qui ont une durée de vie limitée en fonction des objectifs à atteindre et du temps requis pour y parvenir.

Il est à noter en particulier que :

- les groupes de travail sur la thermométrie par contact et sans contact, en collaboration avec le Groupe de travail sur la stratégie, travaillent en étroite coopération afin d'assurer une mise en pratique efficace de la redéfinition du kelvin,
- le Groupe de travail sur l'environnement se concentre sur la collaboration avec la communauté de la météorologie et sur les mesures du climat,
- le Sous-groupe de travail sur les mesures de la température corporelle a été créé afin d'améliorer la mesure de la température corporelle à l'échelle mondiale dans le cadre de la pandémie de Covid-19 et a travaillé afin de publier, en anglais et en espagnol, des directives sur la mesure sans contact de la température corporelle[13],
- le Sous-groupe de travail sur les technologies émergentes, qui a, en particulier, pour objectif de décrire et promouvoir les nouvelles approches photoniques de la thermométrie telles que

[10] https://www.bipm.org/utils/en/pdf/CCT-strategy-document.pdf
[11] https://www.bipm.org/documents/20126/41598583/CCT+Strategy/145827b2-4f6a-42ed-bd77-bbffa782e2f7
[12] https://www.bipm.org/documents/20126/41598622/CCT+Strategy+Summary/f3f211d0-a520-17ae-089f-c70719e39771
[13] Best Practice Guide in forehead thermometry

les résonateurs en anneau, la thermométrie par mesure de la largeur Doppler ou l'*auto-étalonnage*, a récemment publié un article[14] décrivant certains de ses résultats,

– le Sous-groupe de travail sur la transformation numérique a pour mission de s'assurer que le CCT est prêt à répondre aux besoins en matière de transformation numérique de manière appropriée.

Comparaisons

Plusieurs comparaisons du CCT sont en cours d'achèvement depuis la dernière réunion de la CGPM. Ainsi, les comparaisons clés sur la réalisation de l'EIT-90 à l'aide de thermomètres à résistance de platine étalon (CCT-K9) et sur la réalisation de l'EIT-90 au-delà du point de l'argent (CCT-K10) sont presque terminées. Une répétition de la comparaison de la réalisation du point triple de l'eau a débuté en 2021 et progresse de façon satisfaisante. Une comparaison de la réalisation des échelles locales des températures du point de rosée d'un gaz humide est en cours et devrait être achevée d'ici 2025. Le CCT a identifié sept comparaisons clés répertoriées dans le tableau ci-après.

Comparaisons clés du CCT		**Répétitions**	
CCT-K1	Réalisation de l'EIT-90 entre 0,65 K et 24,6 K		
CCT-K2	Réalisation de l'EIT-90 entre 13,8 K et 273,16 K		
CCT-K3	Réalisation de l'EIT-90 entre 83,8 K et 933,4 K	**CCT-K9**	Réalisation de l'EIT-90 entre 83,8 K et 692,7 K
CCT-K4	Comparaison des réalisations locales de mesure du point de congélation de l'aluminium et de l'argent		
CCT-K5	Réalisation de l'EIT-90 entre 961 °C et 1700 °C	**CCT-K10**	Réalisation de l'EIT-90 entre 961 °C et 3000 °C
CCT-K6	Humidité : température des points de rosée et de congélation (-50 °C à 20 °C)	**CCT-K8**	Humidité : température des points de rosée (30 °C à 95 °C)
CCT-K7	Cellules à point triple de l'eau	**CCT-K11**	Répétition prévue en 2019

Relations avec des organismes internationaux

Depuis 2015, le CCT, par l'intermédiaire de son Groupe de travail sur l'environnement, compte plusieurs membres au sein des équipes d'experts de la Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). De façon réciproque, la CIMO a participé au Groupe de travail du CCT.

Le CCT entretient des échanges actifs avec l'International Association on Properties of Water and Steam (IAPWS) sur les questions liées à la métrologie de l'humidité.

La conférence TEMPMEKO, organisée en même temps que Tempbeijing à Chengdu (Chine) en 2019, a été l'événement le plus récent au cours duquel la communauté internationale de la thermométrie a pu échanger. Le prochain séminaire International Temperature Symposium, qui se tiendra en avril 2023

[14] Dedyulin S., Ahmed Z., Machin G., "Emerging technologies in the field of thermometry", 2022, *Meas. Sci. & Technol.* **33** 092001 https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac75b1

en Californie (États-Unis), sera le premier rassemblement des experts de la température depuis la pandémie de Covid-19.

Données sur le CCT

CCT établi en 1937
Président : Y. Duan
Secrétaire exécutif : S. Solve
Composition : 25 membres et 3 observateurs
Liste des membres et observateurs : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cct/members
Réunions depuis la dernière CGPM : 20 octobre, 4 novembre, 17 novembre 2020
19 janvier et 9 février 2021, 18 janvier et 8 février 2022
Rapports complets des réunions : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cct/publications
Sept groupes de travail : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cct

- Aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs)
- Thermométrie par contact
- Environnement
- Humidité
- Comparaisons clés
- Thermométrie sans contact
- Stratégie

Sept sous-groupes de travail :

- Transformation numérique
- Grandeurs thermophysiques
- Technologies émergentes
- Supports d'étalonnage
- Étalonnage et thermocouples de référence
- Température de l'air
- Thermomètres à radiation industriels

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s) [2023-2026]
Comparaisons clés du CCT (et comparaisons supplémentaires)	10	16 + (18)	0
Comparaisons du BIPM	0	0	0
Études pilotes	3	0	3
CMCs	2 940 CMCs en thermométrie publiées dans la KCDB (14 septembre 2022)		

Le président remercie M. Duan pour son rapport et clôt la deuxième séance.

Troisième séance – 16 novembre 2022 (matin)

Le président souhaite la bienvenue aux délégués pour la troisième séance.

18. Le travail du JCTLM face au défi de la standardisation internationale des analyses cliniques en laboratoire

M. Greg Miller, président du Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire (JCTLM) et professeur de pathologie à la Virginia Commonwealth University de Richmond, en Virginie (États-Unis), indique que sa présentation porte sur les mesures des biomolécules dans les fluides corporels par les laboratoires de biologie médicale afin d'éclairer les décisions médicales. Elle abordera également l'importance de l'équivalence des résultats d'analyses pour le domaine de la santé, le rôle de la traçabilité métrologique pour permettre des résultats équivalents, le soutien du JCTLM à l'industrie du diagnostic *in vitro* (IVD), les défis pour parvenir à des résultats d'analyses médicales standardisés au niveau mondial, et les personnes dans tous les pays qui bénéficient des travaux du JCTLM.

M. Miller précise que le JCTLM a été créé en 2002 pour répondre aux exigences réglementaires de la Directive européenne relative aux dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro* (IVDD) – devenue depuis le Règlement européen relatif aux dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro* (IVDR) – qui étaient pertinentes à l'échelle mondiale. Le JCTLM se compose du BIPM, de l'International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC), de l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) et de l'International Council for Standardization in Haematology (ICSH). Le BIPM assure le secrétariat du JCTLM.

M. Miller donne un aperçu de la pratique de la biologie médicale. Lorsqu'une personne bénéficiaire d'un système de santé consulte un médecin dans son cabinet ou à l'hôpital, le praticien qui l'examine prescrit parfois des analyses de laboratoire pour vérifier l'état de santé du patient. Dans le cadre du processus de diagnostic, le patient peut avoir une analyse de sang ou toute autre analyse. L'échantillon est envoyé à un laboratoire de biologie médicale pour être analysé. Les laboratoires de biologie médicale du monde entier sont capables d'effectuer entre 3 000 et 4 000 analyses différentes. Une fois les résultats disponibles, le patient consulte à nouveau son praticien qui pose alors son diagnostic, décide d'un traitement ou détermine de potentiels futurs problèmes de santé.

L'industrie du diagnostic *in vitro* regroupe les entreprises qui développent des systèmes de mesure destinés aux laboratoires de biologie médicale, également appelés dispositifs médicaux *in vitro*. L'industrie du diagnostic *in vitro* pèse 125 milliards de dollars à l'échelle mondiale et commercialise ses produits dans le monde entier. Cette industrie soutient la recherche afin de découvrir de nouveaux biomarqueurs pour certaines maladies et collabore avec les professionnels de laboratoires pour améliorer les soins apportés aux patients en matière de biologie médicale. Les résultats d'analyse sont ainsi le fruit d'une coopération entre l'industrie du diagnostic *in vitro* et les laboratoires de biologie médicale.

M. Miller indique que des résultats d'analyse devraient être les mêmes partout dans le monde : le travail du JCTLM repose sur ce principe. Les résultats d'analyses de laboratoire sont comparés avec des valeurs de référence afin de poser un diagnostic ou d'établir un traitement. M. Miller donne trois exemples : un niveau de glucose supérieur à 7 mmol/L permet de diagnostiquer le diabète, l'une des affections les plus répandues dans le monde ; un taux de troponine supérieur au 99e percentile d'une valeur de référence est un marqueur diagnostique de l'infarctus du myocarde et demande une

intervention urgente ; enfin, le taux de filtration glomérulaire estimé (eGFR) de la créatinine sert de biomarqueur pour le diagnostic des maladies chroniques rénales (lorsqu'il est inférieur à 60 mL/min/1,73m^2). Les exemples où les analyses de laboratoire font partie intégrante du diagnostic et des décisions de traitement sont légion.

M. Miller explique que des erreurs médicales peuvent être dues à la variabilité de la méthode utilisée. Il prend l'exemple d'une étude réalisée en 2012[15] comparant différentes procédures de mesure des taux de parathormone chez 18 individus. La parathormone est responsable de l'homéostasie du calcium, élément particulièrement important pour la régulation du pouls et les contractions musculaires. L'étude compare deux méthodes de mesure du taux de parathormone à l'aide de divers dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro* chez des patients atteints de maladies chroniques rénales, dans le but de déterminer quels patients dépassent la valeur de référence à partir de laquelle est prescrit un médicament permettant de contrôler le métabolisme du calcium. Les deux méthodes ont donné des résultats différents : aucun des patients testés à l'aide de la méthode A n'a rempli les critères de prescription du traitement tandis que cela a été le cas pour la moitié de ceux testés à l'aide de la méthode B. M. Miller indique qu'il s'agit d'un défi pour le secteur de la médecine de laboratoire : en effet, de nombreux dispositifs d'analyse *in vitro* disponibles sur le marché n'ont pas été standardisés de manière à obtenir des résultats équivalents. Concernant la parathormone, un système de référence est en cours de développement dans le cadre d'une collaboration entre l'IFCC (développement d'une méthode de référence), le National Institute for Biological Standards and Control (NIBSC) (développement d'un matériau de référence certifié commutable) et le CCQM (réalisation d'une comparaison de matériaux de référence primaires entre des laboratoires de référence afin de s'assurer que tous les laboratoires de référence peuvent parvenir à des résultats équivalents).

La traçabilité métrologique est l'outil clé permettant de parvenir à une équivalence entre les résultats. Les laboratoires nationaux de métrologie de nombreux pays sont responsables du développement de procédures de mesure et de matériaux de référence. Les fabricants de l'industrie du diagnostic *in vitro* utilisent des étalons d'ordre supérieur afin d'assigner des valeurs à leurs calibrateurs et, en bout de chaîne, à ce que l'on nomme un « calibrateur pour l'utilisateur final ». Les dispositifs médicaux de diagnostic *in vitro*, produits par les mêmes fabricants, sont ensuite vendus aux laboratoires de biologie médicale et utilisés pour analyser des échantillons cliniques. Un système de référence correctement développé permet d'assurer la traçabilité du résultat de l'analyse d'un échantillon à des référence d'ordre supérieur. La norme ISO 17511:2020, suivie par l'industrie du diagnostic *in vitro*, définit la notion de traçabilité métrologique et les exigences à remplir pour y parvenir. Le système de référence à des étalons d'ordre supérieur permet aux dispositifs de diagnostic *in vitro* d'être traçables quel que soit leur fabricant : ils peuvent ainsi produire des résultats équivalents pour un même examen partout dans le monde puisque ce système de référence est stable et reproduisible en tout lieu. De plus, lorsque de nouvelles procédures de mesures de diagnostic *in vitro* sont développées, elles peuvent être reliées à ce système de traçabilité métrologique et fournir des valeurs équivalentes à celles des équipements déjà disponibles sur le marché. Le même système de référence à des étalons d'ordre supérieur peut être maintenu pendant plusieurs années car il répond à l'exigence de stabilité ; il est donc possible de maintenir ce système d'étalonnage sur le long terme et de parvenir ainsi à des résultats équivalents.

M. Miller ajoute que l'ISO dispose d'autres normes internationales concernant les exigences en matière de procédures de mesure de référence (ISO 15193:2009), matériaux de référence certifiés (ISO 15194:2009), e laboratoires d'étalonnage (ISO 15195:2018) utilisant des procédures de mesure de référence. Le JCTLM soutient la biologie médicale et l'industrie du diagnostic *in vitro* en maintenant une base de données des matériaux, méthodes et services de référence d'ordre supérieur, qui ont tous

[15] Almond A, Ellis A.R., Walker S.W.. Current parathyroid hormone immunoassays do not adequately meet the needs of patients with chronic kidney disease. *Ann. Clin. Biochem.* 2012, **49**(1), 63-67. https://doi:10.1258/acb.2011.011094

été évalués par des équipes d'examen afin de vérifier leur conformité aux normes ISO. Tous les systèmes de référence d'ordre supérieur de la base de données du JCTLM ont été examinés et approuvés comme conformes aux normes ISO. Cette procédure nécessite en particulier l'aide du BIPM mais également celle d'un grand nombre de volontaires qui participent aux équipes d'examen dans toutes les disciplines de la biologie médicale.

En octobre 2022, le JCTLM a mis en ligne une nouvelle version de sa base de données. Cette dernière est lisible par machine et propose une interface de programmation d'application (API) pour les matériaux, méthodes et services de référence qui y sont publiés. L'API permet ainsi à l'industrie du diagnostic et aux utilisateurs tiers de se connecter directement à la base de données et d'être informés immédiatement lorsqu'une nouvelle information est publiée. C'est sur cette API que repose le développement d'applications spécifiques à certains utilisateurs et l'intégration des données du JCTLM à des produits numériques. La nouvelle version comprend une application web permettant d'effectuer des recherches au sein de la base de données.

M. Miller répète que la biologie médicale exige des résultats équivalents afin d'utiliser des valeurs de référence cliniques fondées sur des recherches sur l'état de santé des patients. Les fabricants de l'industrie du diagnostic *in vitro* utilisent en toute confiance les références du JCTLM, afin d'assurer la traçabilité métrologique, parvenir à des résultats équivalents pour les échantillons cliniques et respecter les exigences réglementaires pour la commercialisation de leurs produits.

M. Miller évoque l'atelier « *Overcoming challenges to global standardization of clinical laboratory testing: reference materials and regulations* » (Surmonter les défis de la standardisation internationale des analyses cliniques de laboratoire : matériaux de référence et réglementations) organisé conjointement en décembre 2021 par le JCTLM, l'IFCC et l'International Consortium for Harmonization of Clinical Laboratory Results (ICHCLR). Cet atelier en ligne a réuni 400 participants de 65 pays et donné lieu à la publication d'un rapport intitulé « *Overcoming challenges regarding reference materials and regulations that influence global standardization of medical laboratory and testing results* » [16].

L'atelier a permis de formuler un ensemble de recommandations. La première recommandation porte sur le fait de développer les composants d'un système de référence d'ordre supérieur le plus tôt possible dans le cycle de vie des procédures de mesure des diagnostics *in vitro* mises en œuvre par les laboratoires d'analyses médicales. Cela permettrait d'éviter la situation dans laquelle différents fabricants font appel à des système d'étalonnage différents et incompatibles les uns avec les autres, ce qui nécessite de développer un système de référence après la commercialisation des produits. Il est préférable de développer tout système de référence en amont de la mise sur le marché de nouveaux biomarqueurs afin d'encourager dès le départ la standardisation des résultats et permettre d'établir une corrélation des résultants indépendamment des essais cliniques utilisés pour déterminer les valeurs de référence utilisées avec ces nouveaux biomarqueurs. La deuxième recommandation vise à coordonner l'établissement de priorités au niveau mondial concernant les mesurandes exigeant des résultats de mesures standardisés. Il est très important d'utiliser les ressources de la façon la plus efficace possible et la coordination des priorités est indispensable pour éviter tout double effort et pour s'assurer de la prise en compte des substances à analyser les plus importantes. La troisième recommandation porte sur la coordination à l'échelle mondiale de l'approvisionnement en matériaux de référence certifiés. L'industrie du diagnostic *in vitro* repose sur des approvisionnements primaire et secondaire fiables en matériaux de référence, sans toutefois exiger des sources multiples car cela représenterait un double effort. Le fait de changer de fournisseur de matériaux entraîne pour l'industrie des coûts conséquents pour faire de nouveau valider et certifier les matériaux, c'est pourquoi l'industrie cherche des sources

[16] Miller, W., Myers, G., Cobbaert, C., Young, I., Theodorsson, E., Wielgosz, R., Westwood, S., Maniguet, S. and Gillery, P. Overcoming challenges regarding reference materials and regulations that influence global standardization of medical laboratory testing results. 2023, *Clin. Chem. Lab. Med.*, **61**(1), 48-54. https://doi.org/10.1515/cclm-2022-0943

fiables et permanentes de matériaux de référence. Il s'agit d'un défi car les pays étant indépendants les uns des autres, leurs laboratoires nationaux de métrologie pourraient se sentir responsables de veiller à la satisfaction de besoins d'un pays spécifique. Ces trois recommandations pourraient être prises en considération par le CIPM afin de faire partie de ses futures activités dans le domaine de la santé.

L'atelier a également recommandé au JCTLM d'identifier les matériaux de référence utiles mais ne répondant pas à l'intégralité des exigences de l'ISO. Le JCTLM a pour rôle de veiller à ce que toutes les entrées de sa base de données répondent aux exigences de l'ISO, ce qui est un prérequis essentiel pour garantir une acceptation par l'industrie du diagnostic *in vitro* et par les organismes de réglementation du monde entier. La dernière recommandation est d'harmoniser au niveau international l'examen des réglementations. Le développement d'exigences reconnues internationalement en matière d'examen des réglementations doit améliorer la disponibilité de résultats standardisés. Chaque pays souhaite s'assurer que tous les tests de diagnostic *in vitro* produisent des résultats de haute qualité adaptés à la prise en charge des patients, l'examen des réglementations est donc essentiel concernant la sécurité des patients. En raison de la portée nationale des réglementations, l'industrie du diagnostic *in vitro* est souvent contrainte de soumettre ses données sous des formats légèrement différents. Les exigences en matière de données étant différentes selon les pays dans lesquels les produits sont commercialisés, cela entraîne des dépenses considérables pour le secteur de la santé. Le développement d'exigences reconnues à l'échelle internationale concernant l'examen des réglementations améliorera la disponibilité des résultats standardisés tout en réduisant les coûts, les économies ainsi réalisées permettant de normaliser ou de développer de nouveaux systèmes de traçabilité métrologique.

M. Miller termine sa présentation en rappelant que le travail du JCTLM profite à tous les systèmes de santé de la planète et à tous leurs bénéficiaires.

Le président remercie M. Miller et demande s'il y a des questions. La question est posée de savoir s'il existe une recommandation quant au développement de matériaux de référence à mesure que de nouveaux dispositifs de diagnostic sont élaborés.

M. Miller répond que l'objectif est de s'assurer que lorsqu'un fabricant de dispositifs de diagnostic *in vitro* est le premier à commercialiser un nouveau biomarqueur, il prenne la responsabilité de vérifier que des systèmes de référence sont développés dès le processus de développement initial. Il s'agit d'un défi car la compétition règne dans l'industrie du diagnostic *in vitro* : être le premier à commercialiser une nouvelle procédure d'analyse de laboratoire permet de maximiser ses profits en bénéficiant de sa situation de monopole. Si le test s'avère performant, d'autres fabricants entreront sur le marché. L'objectif est de fournir des ressources suffisamment tôt dans le cycle de vie d'un nouveau biomarqueur afin que les nouveaux fabricants puissent se servir de ces ressources et éviter des situations similaires à celle de la parathormone expliquée précédemment. S'il n'existe pas de solution simple à ce problème, la communauté des laboratoires et l'industrie du diagnostic *in vitro* reconnaissent qu'il serait souhaitable de le résoudre.

19. Le rôle de la précision des diagnostics dans le cadre de la préparation métrologique à de potentielles futures pandémies

Mme Maria Zambon, directrice des services de référence sur la grippe, les infections respiratoires, la virologie et la poliomyélite de la UK Health Security Agency (Agence nationale de santé publique du Royaume-Uni), donne une présentation - enregistrée en amont de la conférence - sur le rôle de la précision des diagnostics dans le cadre de la préparation métrologique à de potentielles futures pandémies. Mme Zambon explique avoir passé les vingt dernières années à développer des méthodes de détection de nouveaux virus émergents.

Mme Zambon explique que l'on a tous fait l'expérience de la réponse apportée à l'épidémie de coronavirus. Sa présentation portera sur certaines des expériences de mise au point de méthodes de diagnostic du SARS. Elle précise qu'entre 2020 et 2022, il a également été nécessaire d'apporter une réponse face à d'autres virus, connus ou inconnus, qui ont exigé le développement de nouveaux tests de détection. L'année 2022 a vu une flambée des cas d'hépatite à l'étiologie indéterminée, pour laquelle de nouveaux tests de détection ont dû être mis au point, ainsi qu'une résurgence de la polio sur le sol britannique pour la première fois en quarante ans. L'épidémie de polio a été découverte à l'aide de la surveillance environnementale, ce qui a été possible en améliorant les méthodes actuelles de détection et en en mettant au point de nouvelles afin de permettre une surveillance au niveau des communautés. En outre, l'épidémie de variole simienne continue son évolution à travers le monde. Tous ces sujets exigent une réponse urgente et immédiate des services de santé publique, y compris le développement de nouveaux tests de détection.

L'apparition de nouveaux virus représente un défi considérable pour la pose de diagnostics. Tous les virus émergents ne conduisent pas à une pandémie mais les questions relatives à la préparation en matière de diagnostic et à la capacité de réponse se posent toujours de la même manière aux stades précoces d'une épidémie, qui se comptent en heures, en jours ou en semaines plutôt qu'en mois ou en années. Mme Zambon présente le calendrier de l'émergence du SARS-CoV-2 au Royaume-Uni. Au début de l'épidémie, la réponse d'urgence a été suivie d'un besoin d'étendre les capacités de diagnostic à mesure de l'augmentation du nombre de cas. Il a ensuite fallu identifier et lutter contre la diversité virale lorsque le virus s'est installé au sein de la population, avec l'émergence de nouveaux variants. Chaque phase de la réponse a amené de nouveaux défis, qui sont allés de la nécessité de trouver de nouveaux réactifs et de nouveaux étalons d'analyse quantitative pendant la phase urgente de « détection d'un nouveau virus » jusqu'à la capacité à lutter contre de nouveaux variants pendant la phase finale de la pandémie. Les phases « interpandémique » ou de « retour à la normale » doivent être l'occasion d'enquêter et de mieux se préparer, y compris par la mise au point de nouvelles méthodologies et d'exercices de répétition.

Mme Zambon prend l'exemple du SARS-CoV-2 pour illustrer certains aspects de la réaction à la pandémie. Un consortium de laboratoires internationaux à l'origine du premier test de détection du coronavirus, sous l'égide de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), a publié un article au sujet de ses travaux[17]. Les premiers cas rapportés de pneumonie aigüe en Chine remontent au 30 décembre 2019. Le 8 janvier, l'OMS a convoqué un groupe d'experts dont faisait partie le Center for Disease Control and Prevention d'Atlanta (États-Unis). Entre le 8 et le 23 janvier 2020, un travail considérable a été entrepris par les laboratoires pour mettre au point des tests d'amplification des acides nucléiques (TAAN) pour le nouveau virus, ce qui a conduit le 23 janvier à la publication d'un rapport détaillant la méthodologie employée. L'OMS a qualifié l'épidémie d'urgence de santé publique internationale le 30 janvier 2020. Le groupe d'experts comprenait deux entreprises spin-off qui constituaient des partenaires à petite échelle, en mesure de développer les premiers réactifs essentiels nécessaires aux travaux d'élaboration préliminaires, y compris des transcriptions in vitro. Ce mode d'action souligne que si l'expertise scientifique et les capacités des laboratoires sont indispensables au début des pandémies, un partenariat avec l'industrie s'avère nécessaire pour produire des réactifs rapidement et à grande échelle.

Le développement de tests d'amplification des acides nucléiques requiert de connaître le génome qui fait l'objet de la détection. Cette modalité de diagnostic est employée pour les virus à partir de la réaction par PCR. Mme Zambon présente un schéma du génome du SARS-CoV-2. La production des réactifs, des enzymes et des espèces chimiques nécessaires pour mener des tests d'amplification des acides nucléiques demande une connaissance de la réplication virale du virus étudié afin de déterminer

[17] Corman V.M. *et al*, Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR. *Euro Surveill.*, 2020, **25**(3), 2000045. https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000045

quels types de matrices pourront servir à élaborer de nouveaux tests de détection. Les matrices peuvent être des virus purifiés, des cellules infectées par un virus, des particules semblables à des virus générées par l'assemblage de molécules, des recombinants, des séquences d'ARN transcrit ou d'autres matériaux synthétiques, qui peuvent servir de matrices et de matériaux cliniques de substitution. Des matrices adaptées sont requises par la réaction biochimique initiale sur laquelle se fondent les tests de détection à partir de l'amplification des acides nucléiques. Les moyens d'y parvenir sont nombreux ; toutefois, il arrive de découvrir un nouveau virus sans particules virales ni aucun moyen de le faire se reproduire. Lorsque ces données de départ ne sont pas connues, il est nécessaire de recourir à des matrices alternatives obtenues à l'aide de virus très semblables déjà disponibles ou bien créées à l'aide de systèmes de synthèse ou d'une méthode d'ingénierie génétique appelée « génétique inverse ».

La seconde étape du développement de tests adaptés d'amplification des acides nucléiques consiste à rassembler un panel de matériel clinique qui peut soit contenir le bon virus, ce qui est particulièrement rare dans le cas d'une infection virale émergente, soit résulter d'un syndrome clinique similaire ou contenir des souches virales similaires. Cette méthode est liée aux notions de sensibilité et de spécificité : suite à l'élaboration d'un test d'amplification des acides nucléiques à partir des meilleures technologies biochimiques dont un laboratoire dispose, le test doit être essayé sur du matériel clinique, ce qui peut affecter sévèrement la spécificité de la biochimie. Les tests d'amplification des acides nucléiques sont incapables de différencier les virus infectieux de ceux qui ne le sont pas, ce qui pose un problème considérable pour l'application à des virus émergents mais revêt une importance moindre dans les premières phases de détection.

Mme Zambon rappelle que le processus de développement puis d'évaluation des performances des tests de diagnostic repose sur de nombreux éléments différents, parmi lesquels la disponibilité des matériaux et la nécessité d'un système d'assurance, ainsi qu'une documentation soutenant le projet. Il y a là une opportunité de s'intéresser à la façon dont les individus et les institutions disposant d'une expertise en métrologie peuvent contribuer à répondre aux situations d'urgence entraînées par l'émergence de nouveaux virus chez l'homme, en particulier dans les domaines de l'assurance, de la documentation et du développement de logiciels.

Lors du développement d'un nouveau test, particulièrement pendant la phase de biochimie, l'attention doit être portée en priorité à la détermination de la limite de détection du test étudié. Mme Zambon présente l'exemple de la détermination des limites de détection à partir de l'ARN génomique du coronavirus responsable du SRAS et de l'ARN transcrit in vitro spécifique au nouveau coronavirus découvert en 2019. Les travaux sur la limite de détection sont essentiels pour éviter les faux positifs et les faux négatifs qui peuvent tous deux entraîner des difficultés pour les systèmes de santé aux différents stades d'une pandémie. Aux premiers stades d'une pandémie, lors des première détections d'urgence de nouvelles infections, les faux négatifs posent des difficultés car ils font passer certaines infections sous les radars. Dans les phases suivantes, ce sont les faux positifs qui deviennent problématiques.

Mme Zambon explique que la réplication virale a une cinétique complexe. Des recherches menées à l'Imperial College (Royaume-Uni) depuis 2020 s'intéressent à la relation entre la détection par amplification des acides nucléiques et la détection par virus infectieux dans le cas du SARS-CoV-2. Les chercheurs ont découvert que la quantité de particules virales infectieuses détectées était beaucoup moins importante que la quantité d'ARN viral détecté. Cette relation est importante du point de vue du contrôle de l'infection et particulièrement pertinente en raison des différences de sensibilité d'un test à l'autre. L'immunochromatographie est fondée sur la détection de protéines virales et ne nécessite pas d'étape d'amplification du signal. D'autres tests, comme l'amplification isothermique médiée par les boucles, reposent sur une amplification isothermique avec une cinétique différente de celle de la PCR. L'immunochromatographie, l'amplification isothermique médiée par les boucles et la PCR sont toutes capables de détecter les virus mais avec des sensibilités différentes.

Mme Zambon ajoute que l'état actuel de la réglementation concernant la polio entraîne des conséquences sur le développement des tests de diagnostic. L'OMS a récemment présenté la 4e édition de son plan mondial d'action pour l'éradication du poliovirus (GAP IV), un règlement concernant la gestion des risques biologiques destiné à soutenir l'éradication de la polio. GAP IV appelle à mettre fin à toutes les activités pouvant propager le virus, à transférer ou à détruire tout matériel renfermant du poliovirus, et à interdire le stockage de matériels contenant du poliovirus ainsi que l'utilisation d'acides nucléiques endogènes. Les pays concernés par le règlement GAP IV sur la gestion des risques biologiques devront développer des matrices alternatives afin d'améliorer leurs tests de diagnostic. Les pays étant soumis à d'autres règlements, comme l'ACDP (Advisory Committee on Dangerous Pathogens) au Royaume-Uni, auront la possibilité de continuer à travailler avec des souches du virus. En revanche, la plupart des pays suivant un programme d'éradication de la polio devront suivre le GAP IV.

Mme Zambon conclut en ajoutant que certaines des idées mentionnées dans sa présentation ont fait l'objet de débats avec le CCQM afin de mettre au point une feuille de route sur la préparation métrologique pour répondre à une pandémie de maladie infectieuse. Le but des discussions concernant cette feuille de route est de combler certaines lacunes qui ont été identifiées et de répondre aux besoins en matière d'assurance de la qualité. Des besoins ont été définis afin de mieux être préparés à de futures pandémies, y compris sur les plans de la méthodologie et de la production. Il existe également des besoins en matière d'analyse qui concernent le développement de logiciels et la rédaction d'une documentation nécessaire à un changement d'échelle rapide.

Le président remercie Mme Zambon pour sa présentation pré-enregistrée. M. Julian Braybrook, président du Groupe de travail du CCQM à l'origine de la feuille de route sur la préparation métrologique pour répondre à une pandémie de maladie infectieuse est invité à résumer les points essentiels de cette feuille de route ainsi que les actions prévues pour les quinze prochains mois.

M. Braybrook remercie toutes les personnes ayant contribué au développement de la feuille de route et rappelle qu'elle est le fruit d'un effort commun. Il ajoute qu'un certain nombre de recommandations sont nées du développement de la feuille de route et qu'elles peuvent être regroupées ainsi : besoins en matière de contrôle de la qualité, lacunes, future préparation. Un groupe spécifique a été créé pour travailler sur certaines des questions déjà identifiées et ce jusqu'à décembre 2023. Un des résultats souhaités serait de disposer de solutions métrologiques déployables rapidement. Des simulations seront effectuées afin de démontrer l'aptitude de la communauté de la métrologie à répondre à de futures pandémies le plus rapidement possible. La communauté de la métrologie a réagi au SARS-CoV-2 en l'espace de quatre mois à partir du moment où elle en a eu la capacité, c'est-à-dire neuf mois après le début de la pandémie. Mme Zambon a souligné que des solutions étaient à l'étude afin de permettre une réponse en moins d'un mois. Les exercices devront permettre de démontrer les capacités et de trouver des solutions dans les domaines qui présentent encore des lacunes. Le groupe spécifique doit examiner des approches reposant sur la normalisation qui pourront être utilisées au moment de définir les spécifications minimales acceptables pour que des produits soient utilisables par l'industrie des diagnostics *in vitro*. Une dernière difficulté réside dans la façon de transférer, déployer, et maintenir les capacités qui ont déjà été développées et dans les solutions à adopter pour les étendre à l'intégralité de la communauté de la métrologie, y compris les organisations régionales de métrologie. Ce projet devrait prendre la forme de lignes directrices et de ressources de formation qui seront disponibles à partir du milieu de 2023 sur le site web du BIPM.

Le président remercie M. Braybrook et demande s'il y a des questions.

M. Milton pose une question à M. Braybrook, M. Park (président du CCQM) et M. Wielgosz (secrétaire exécutif du CCQM) quant au processus utilisé pour établir la feuille de route. Il ajoute qu'il s'agit d'un nouveau moyen pour les comités consultatifs du CIPM de consulter rapidement les laboratoires nationaux

de métrologie afin d'obtenir un consensus, des avis, ouvrir une discussion et mettre en commun différentes difficultés et conceptions opposées. M. Milton demande s'il s'agit d'un mécanisme que les autres comités consultatifs pourraient adopter dans les domaines où les nouveaux besoins des parties prenantes posent des difficultés. M. Braybrook répond qu'il s'agit là d'une possibilité. Ce processus a réuni des représentants des pays qui ont joué un rôle important au début de la réponse face à l'épidémie de SARS-CoV-2, bien que toutes les parties n'aient pas été impliquées. Cela a permis d'effectuer des déploiements plus rapides. M. Braybrook ajoute que le CCQM a fréquemment recours à des groupes spécifiques, qui permettent de réaliser des travaux en prévision d'un besoin futur et non après-coup.

20. Rapport de l'AIEA sur les activités de liaison

Mme Zakithi Msimang, radiophysicienne médicale et responsable du réseau des laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie (LSED) à la section de la dosimétrie et de la radiophysique médicale de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), donne une présentation invitée sur la collaboration entre l'AIEA et le BIPM.

L'AIEA s'efforce de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier. En collaboration avec ses 173 États Membres et ses nombreux partenaires dans le monde, elle œuvre à la promotion de l'utilisation sûre, sécurisée et pacifique des technologies nucléaires. Le travail de l'AIEA s'organise autour de trois piliers : les garanties et la vérification, la sûreté et la sécurité nucléaires, la science et la technologie nucléaires. L'AIEA remplit son mandat à l'aide de six départements, cette présentation s'intéressant particulièrement au travail du département des sciences et des applications nucléaires. Ce département rassemble la division des laboratoires de l'environnement marin, celle de la santé humaine et celle des sciences physiques et chimiques. Le laboratoire de l'environnement marin interagit avec le CCQM en participant à ses groupes de travail, aux comparaisons et à l'élaboration de certains documents de référence utilisés par les États Membres. La division des sciences physiques et chimiques s'intéresse aux mesures de neutrons et participe aux activités du CCRI. Le département des sciences et des applications nucléaires gère douze laboratoires situés à Seibersdorf (Autriche), Vienne et Monaco.

La division de la santé humaine de l'AIEA a pour mission de renforcer la capacité des États Membres à répondre aux besoins en matière de prévention, de diagnostic et de traitement des problèmes de santé à l'aide de techniques nucléaires. Les quatre sections de la division sont les suivantes : radiobiologie appliquée et radiothérapie, dosimétrie et radiophysique médicale, médecine nucléaire et imagerie diagnostique, études de nutrition et écologie sanitaire. La section de la dosimétrie et de la radiophysique médicale comprend un groupe sur la physique médicale, un laboratoire de dosimétrie, le secrétariat du réseau AIEA/OMS de laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie (LSED) et un groupe dédié à l'éducation et à la formation. Ce dernier est chargé de former les États Membres à la mise en œuvre des technologies nucléaires à des fins médicales de diagnostic radiologique et de radiothérapie.

Le groupe de physique médicale élabore et harmonise des lignes directrices sur les différents aspects physiques et techniques du contrôle qualité afin d'encourager une utilisation sûre et efficace des rayonnements dans le domaine médical. Le laboratoire de dosimétrie offre des services d'étalonnage et d'audit aux États Membres. Seuls les États Membres du réseau LSED ainsi que certains hôpitaux dans les pays ne disposant pas de laboratoire peuvent bénéficier des services d'étalonnage. Le réseau AIEA/OMS de LSED dispose de 88 laboratoires situés dans 75 États Membres. Le réseau compte également 16 laboratoires primaires d'étalonnage pour la dosimétrie (LPED) comme membres affiliés ainsi que cinq organisations partenaires dont le BIPM. Le réseau de LSED a pour objectif de garantir

l'exactitude, la traçabilité et la cohérence des mesures et de promouvoir une coopération entre les utilisateurs et une harmonisation des normes utilisées pour les mesures. L'AIEA assure la traçabilité de ses mesures via le BIPM et elle ne réalise que des étalonnages de chambres d'ionisation. L'AIEA a étalonné 693 chambres d'ionisation dans 77 États Membres depuis 2010. Au total, 7 172 coefficients d'étalonnage ont été calculés et utilisés par les LSED pour étalonner des équipements dans des hôpitaux.

Mme Msimang rappelle que l'AIEA a signé le CIPM MRA en 1999 et pris part, en 2003, à l'audit des laboratoires de rayonnements ionisants du BIPM. Le BIPM et l'AIEA ont signé un protocole d'accord en juin 2012 qui permet au Département des rayonnements ionisants du BIPM d'utiliser un irradiateur dans les locaux de l'AIEA. L'AIEA participe à tous les groupes de travail du CCRI et à certains des groupes du CCQM. M. David Burns, du Département des rayonnements ionisants du BIPM, est membre du comité scientifique du réseau AIEA/OMS de LSED qui passe en revue et établit la stratégie de la section de dosimétrie et de radiophysique médicale.

L'AIEA forme ses États Membres à diverses activités et produit des documents d'orientation utilisés pour réaliser des mesures au sein des hôpitaux. L'International Symposium on Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry (Congrès international sur les normes et les codes de pratique en dosimétrie médicale), qui s'est tenu en 2002, 2010 et 2019, est le seul évènement à réunir des chercheurs issus des laboratoires (LPED et LSED) et des radiophysiciens médicaux des hôpitaux. Le congrès porte sur les normes, les applications et le contrôle de la qualité en matière de dosimétrie médicale. Les experts du Département des rayonnements ionisants du BIPM ont participé activement aux congrès, en donnant en particulier leurs vues sur des aspects techniques et sur le CIPM MRA. Cette promotion de la métrologie est essentielle car certains LSED n'ont aucune connaissance en métrologie. Certains ne connaissent pas non plus l'infrastructure de la qualité car ils appartiennent au cadre réglementaire. L'action du BIPM a permis à un nombre croissant de LSED de mieux comprendre le fonctionnement du CIPM MRA et de l'infrastructure de la qualité. En retour, les LSED concernés ont été désignés par leurs laboratoires nationaux de métrologie. L'AIEA publie notamment des codes de pratique en dosimétrie, des directives pour les mesures de rayonnements et des directives pour l'assurance et le contrôle de la qualité. Le personnel du Département des rayonnements ionisants du BIPM participe de manière significative à la rédaction et à l'examen de nombreux documents, en particulier en matière de radiologie médicale.

Mme Msimang ajoute qu'au-delà de la collaboration depuis de nombreuses années entre les laboratoires de dosimétrie et de radiophysique médicale de l'AIEA et le BIPM, il est possible de collaborer dans d'autres domaines qui pourraient bénéficier aux États Membres. Des collaborations plus importantes pourraient être envisagées avec le centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, chargé des recherches en matière de sûreté et de contrôles de l'alimentation, ou avec la division des sciences physiques et chimiques, en charge des données nucléaires.

Le président remercie Mme Msimang et demande s'il y a des questions.

M. Milton remercie Mme Msimang et demande si cette collaboration avec le centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture pourrait être établie avec le CCRI. Mme Msimang répond que le sujet intéresserait probablement plus le CCQM. M. Louw, président du CIPM, ajoute que l'intérêt de cette réponse est de faire écho aux propositions précédentes sur la création de forums transversaux. Il demande s'il faudrait créer un forum transversal entre le CCRI et le CCQM et si l'AIEA serait intéressée d'y participer. Mme Msimang répond que certains projets pourraient être reliés, comme l'observation de l'environnement et les analyses de produits alimentaires pour détecter la présence de radionucléides.

21. Rapport du président du CCRI

M. Martyn Sené, président du Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), présente son rapport sur les activités du CCRI depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCRI

De 2019 à 2022, le CCRI a poursuivi son objectif, à savoir permettre à tous les utilisateurs de rayonnements ionisants de réaliser des mesures en toute confiance à un niveau d'exactitude qui convient à leur usage, et ce afin d'exploiter le plein potentiel des rayonnements ionisants tout en en réduisant au maximum les risques. Le CCRI et ses trois sections centrées chacune sur des aspects spécifiques de la métrologie des rayonnements ionisants ont continué à travailler avec la communauté de la métrologie et avec un grand nombre d'utilisateurs finaux et de parties prenantes afin de s'assurer que le CCRI tient compte de leurs besoins et collabore avec eux pour accomplir sa mission.

De 2019 à 2022, le CCRI a accueilli cinq nouveaux membres, un nouvel observateur et deux nouveaux organismes de liaison. Le CCRI compte au total 48 laboratoires et organisations qui participent à ses réunions plénières ou à celles de ses sections.

L'activité du CCRI requiert une énorme quantité de travail afin de maintenir l'intégrité, la validité et l'utilité des CMCs dans le domaine des rayonnements ionisants et d'améliorer certaines des données fondamentales qui les étayent. La contribution du BIPM à ce travail est à souligner : 80 % des 110 comparaisons réalisées entre 2019 et 2022 étaient des comparaisons bilatérales du BIPM.

Parmi les principales réalisations du CCRI au cours des quatre années passées figurent les suivantes :

- un groupe de travail rassemblant des métrologistes et des parties prenantes de la communauté médicale a été créé afin d'examiner les questions de mesure soulevées par l'évolution rapide des domaines de la thérapie par radionucléides et de l'imagerie nucléaire quantitative ;
- un nouveau groupe spécifique en collaboration avec le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM) étudie l'introduction de nouvelles technologies de mesure des faibles courants des chambres d'ionisation utilisées pour les mesures d'activité de radionucléides étalons, ainsi que pour des applications médicales et de protection des rayonnements ionisants ;
- une coopération avec le Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie (CCQM) vise à comprendre comment tirer parti des évolutions métrologiques dans la spectrométrie de masse afin d'utiliser cette technique dans les mesures de radionucléides de faible activité (par exemple dans l'environnement) ou de longue durée de vie (par exemple dans les déchets nucléaires ou dans le cadre de la criminalistique nucléaire).

Les contraintes imposées par la pandémie de Covid-19 sur l'organisation du travail ont permis de mettre en place de nouvelles méthodes virtuelles de communication et d'implication de la communauté. Ainsi, une série de webinaires a permis de rassembler les parties prenantes et les métrologistes du monde entier, avec un total pour 17 webinaires de 1 277 participants venant de 89 États et Entités économiques. Le CCRI a créé un Groupe de travail sur la communication afin de continuer à utiliser, entre autres, ces nouvelles méthodes (en personne et en ligne) pour soutenir le CCRI dans l'accomplissement de sa mission.

À l'avenir, le CCRI continuera à relever des défis mais devra également s'engager dans la révolution numérique, notamment en intégrant le cadre numérique du SI à la métrologie des rayonnements ionisants. Les évolutions technologiques, telles que les réacteurs nucléaires de conception innovante et la transition de la production d'énergie par fusion nucléaire de la R&D vers son application commerciale, créeront de nouvelles exigences.

Le succès et l'impact du CCRI sont le fruit du travail d'un grand nombre de personnes de la communauté mondiale des rayonnements ionisants, dont il faut souligner l'engagement et saluer la contribution.

Domaine de compétence du CCRI

Les rayonnements ionisants continuent à être utilisés dans le monde entier dans de nombreuses applications utiles dans les domaines de la santé, de la recherche, de la production et la caractérisation de matériaux, et du soutien à des sources d'énergie fiables (décarbonées). Néanmoins, les rayonnements ionisants sont également connus pour les dommages physiques et matériels qu'ils peuvent entraîner, dont le risque de cancer. La vision et la mission du CCRI, ainsi que la mission du Département des rayonnements ionisants du BIPM, reconnaissent et traduisent le rôle important du CCRI en la matière.

Vision du CCRI

La vision du CCRI est celle d'un monde où des mesures exactes et scientifiquement rigoureuses permettent d'utiliser les rayonnements ionisants au bénéfice de la santé, de l'industrie et de la technologie avec l'assurance que les risques associés sont réduits au maximum.

Mission du CCRI

La mission du CCRI est de discuter des étalons de mesure nationaux dans le domaine des rayonnements ionisants ainsi que d'encourager, de permettre et de coordonner leur développement, leur comparaison et leur promotion. Le CCRI a pour objectif de permettre à tous les utilisateurs de rayonnements ionisants de réaliser des mesures en toute confiance et à un niveau d'exactitude pertinent.

Mission du Département des rayonnements ionisants du BIPM

La mission du Département des rayonnements ionisants est de soutenir le CCRI afin qu'il exécute sa mission, de promouvoir le travail de la communauté internationale de la métrologie, et de fournir des services aux laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés qui peuvent être centralisés de manière efficace.

En novembre 2022, le CCRI comptait 13 membres, quatre organismes de liaison et dix observateurs. Au cours de la période de quatre ans qui a suivi la 26e réunion de la CGPM, le CCRI a accueilli cinq nouveaux membres, un nouvel observateur et deux nouveaux organismes de liaison. Le travail du CCRI s'appuie sur trois « Sections » centrées chacune sur des aspects spécifiques de la métrologie des rayonnements ionisants. De 2019 à 2022, huit groupes de travail ou groupes spécifiques ont dédié leur travail à des questions particulières de la métrologie des rayonnements ionisants. Le directeur du Département des rayonnements ionisants du BIPM est secrétaire exécutif (d'office) du CCRI.

Stratégie

L'actuelle stratégie du CCRI a été élaborée par les membres du CCRI en consultation avec l'ensemble de la communauté métrologique des rayonnements ionisants, ainsi que par ses parties prenantes clés : elle a été publiée pour la première fois en 2018, puis mise à jour en juin 2021 à la suite d'une vaste consultation visant à prendre en considération les nouvelles évolutions dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants et leurs applications par les parties prenantes. La stratégie s'inscrit dans le cadre de la révision stratégique plus vaste menée par le CIPM et qui sera présentée en détail lors de la 27e réunion de la CGPM.

La stratégie définit les principaux défis scientifiques, économiques et sociétaux, ainsi que les évolutions de la science, des technologies et des applications des rayonnements ionisants qui déterminent le travail du CCRI. Ainsi, cinq objectifs stratégiques de haut niveau ont été fixés :

- améliorer la comparabilité mondiale des mesures ;
- renforcer les capacités de laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés de moindre envergure ;
- faire évoluer l'état de l'art concernant les questions identifiées par les parties prenantes comme offrant un avantage pour les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés et pour le BIPM ;
- étendre la couverture des services étayés par des CMCs ;
- coordonner la mise en place du cadre numérique du SI dans le domaine de la métrologie des rayonnements ionisants.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Comparaisons/CMCs

L'activité du CCRI requiert une énorme quantité de travail afin de maintenir l'intégrité, la validité et l'utilité des CMCs dans le domaine des rayonnements ionisants et d'améliorer certaines des données fondamentales qui les étayent. Le CCRI s'est employé à se défaire d'obstacles rencontrés par les laboratoires nationaux de métrologie lorsqu'ils soumettent des CMCs entre différentes régions, et ce à toutes les étapes du processus. Une évolution importante, accomplie par le Groupe de travail sur les CMCs en collaboration avec les organisations régionales de métrologie, a été de mettre en place un tutoriel en ligne sur la façon d'entrer les déclarations de CMCs en métrologie des rayonnements ionisants. Ce tutoriel fait désormais partie du matériel de formation et d'apprentissage en ligne mis à disposition par le BIPM.

Le tableau ci-après synthétise les activités du CCRI en matière de comparaisons au cours de la période 2020-2023 (y compris les comparaisons qui devraient s'achever lors de la dernière année du programme de travail) par rapport à la période précédente (2016-2019).

		Dotation 2020-2023				**Dotation 2016-2019**		
		Terminée(s)	En cours	Programmée(s)	**Total**	Terminée(s)	En cours	**Total**
CCRI	clé	1	2	2	**5**	4		**4**
	supp.	1	3		**4**	2	1	**3**
RMO	clé		8		**8**	6		**6**
	supp.	2	2	2	**6**	6		**6**
BIPM		24	35	28	**87**	54	10	**64**

Ces données montrent que le nombre total de comparaison pour 2020-2023 devrait être considérablement plus élevé que pour 2016-2019. Cette augmentation résulte en grande partie, mais pas en totalité, du nombre important (et croissant) de comparaisons bilatérales conduites par le BIPM (environ 80 % du total). L'importance et la valeur de ce travail, comme d'autres activités du Département des rayonnements ionisants du BIPM, sont révélées au travers des réponses à la consultation entreprise dans le cadre de l'élaboration de la stratégie du CCRI.

Par ailleurs, le nombre de publications liées aux comparaisons[18] a augmenté de façon considérable.

En octobre 2022, le nombre total de CMCs dans le domaine des rayonnements ionisants enregistrées dans la KCDB est de 3 779, ce qui correspond à une légère baisse (autour de 5 %) par rapport au nombre de CMCs fin 2019. C'est le résultat d'un rééquilibrage effectué parmi les nouvelles CMCs des trois sections et d'un travail visant à réduire ou regrouper des catégories de CMCs (en particulier celles des sections II et III).

De plus amples détails sur ce travail (ainsi que sur le soutien apporté par le BIPM) sont donnés ci-après dans les rapports des trois sections du CCRI.

Section I du CCRI : Rayons x et gamma, particules chargées (Président : Malcolm McEwen, vice-président : Massimo Pinto)

La Section I du CCRI supervise un programme de comparaisons robuste qui s'appuie sur les laboratoires des rayonnements ionisants du BIPM. Les comparaisons clés BIPM.RI(I) K1 à K9 sont toutes conduites sous la forme de comparaisons bilatérales entre le laboratoire participant et le BIPM, ce qui fonctionne parfaitement. Au cours de la période 2020-2023, il a été convenu de lancer une nouvelle comparaison clé, K9, sur la détermination de la dose absorbée dans l'eau pour les faisceaux de rayons x de moyennes énergies. Cette comparaison clé concerne l'utilisation continue de ces faisceaux de rayonnement dans la thérapie contre le cancer ; les incertitudes actuelles sur le lieu d'utilisation peuvent être considérablement réduites par cette nouvelle comparaison / ce nouvel étalon. Les organisations membres continuent à travailler sur des étalons pour d'autres modalités de faisceau, en particulier les faisceaux d'électrons, de protons et d'ions légers de hautes énergies, et des discussions sont en cours quant à un calendrier approprié pour le lancement de comparaisons clés pour ces faisceaux. Une comparaison supplémentaire a été menée avec succès par la Section I du CCRI : elle concerne la dosimétrie dans le domaine des procédés industriels (comme la stérilisation de matériel médical). Aspect inédit de cette comparaison, le laboratoire pilote (CRNC, Canada) n'a pas fait partie des participants, ce qui a permis de mieux comprendre les options de pilotage de futures comparaisons.

Section II du CCRI : Mesure des radionucléides (Présidente : Lisa Karam, vice-présidente : Freda van Wyngaardt)

Les comparaisons de la Section II du CCRI ont connu une expansion des capacités de support du BIPM aux mesure mondiales. En plus des radionucléides ^{99m}Tc, ^{18}F, ^{64}Cu et ^{11}C, les mesures réalisées à l'aide de l'instrument de transfert du Système international de référence (SIRTI), utilisable depuis 2021 en connexion à distance, couvrent une plus large variété d'éléments(comme ^{123}I, ^{153}Sm, et en préparation : ^{13}N, ^{56}Mn, ^{68}Ga, et ^{166}Ho). Des projets de versions régionales du SIRTI et l'extension du soutien du BIPM concernant les mesures de sources émettrices de particules beta (puis dans le futur d'émetteurs alpha) à l'aide du SIR étendu (ESIR) sont prévus après 2022. Des plans stratégiques au sujet d'autres comparaisons d'activité de radionucléides sont élaborés à partir d'un programme de cycles de comparaisons sur dix ans, ainsi que de la « matrice des méthodes de mesure » (MMM).

Du point de vue administratif, la Section II du CCRI a révisé et réduit le nombre de catégories de service pour les CMCs concernant les radionucléides afin d'optimiser leur saisie et leur examen ; elle a également préparé plusieurs documents d'interprétation (« *Guidance on Applying the MMM in Using Comparison Results to Support CMCs* », « *The Interpretation of CMCs* » et « *An Interpretation of CIPM MRA-G-11: Implications and Impacts for CCRI* ») afin d'adapter les directives du CIPM MRA au contexte de la métrologie des rayonnements ionisants. La Section II élabore une proposition sur la façon de faire évoluer les CMCs en métrologie des radionucléides afin de passer de l'approche

[18] En trois ans, de 2020 à 2022, le nombre de rapports de comparaison dans le domaine des rayonnements ionisants publiés dans *Metrologia* a déjà augmenté de 25 % par rapport à l'ensemble de la période de quatre ans du précédent programme de travail (2016-2019). En comptant les publications en préparation, cette augmentation pourrait avoisiner les 75 % fin 2023.

actuelle de catégorisation selon les radionucléides à une catégorisation en fonction de la méthode (ce travail est effectué au sein du Groupe de travail sur les CMCs en collaboration avec les organisations régionales de métrologie).

Section III du CCRI : Mesures neutroniques
(Président : Andreas Zimbal, vice-président : Neil Roberts)

La Section III du CCRI, qui constitue un forum pour la métrologie des neutrons, s'est étendue ces dernières années afin de rassembler la plupart des laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés actifs dans ce domaine. Cela se reflète dans l'augmentation à la fois du nombre de participants (en particulier du fait de la possibilité de participer en ligne aux réunions) et du nombre de comparaisons clés ou supplémentaires pilotées par la Section III du CCRI (avec, par conséquent, un nombre limité d'activités et de comparaisons conduites au niveau régional) : quatre comparaisons ont été réalisées ou sont en cours pour la période 2019-2022 et deux doivent débuter en 2023-2024.

De 2019 à 2022, un travail a été entrepris afin de réduire le nombre de CMCs en se concentrant sur les grandeurs de base du domaine, les services complémentaires (grandeurs dérivées) offerts par les laboratoires nationaux et désignés étant intégrés dans leur système de management de la qualité.

Une autre tâche importante qui découle de la révision de la stratégie du CCRI a été de développer une réponse afin de pouvoir anticiper les besoins futurs dans le domaine de la métrologie des neutrons. Cela exigera le développement de nouvelles méthodes de mesure et de nouveaux champs neutroniques de référence qui, en raison de la nécessité d'avoir recours à des équipements de plus en plus imposants, doivent souvent être partagés par plusieurs laboratoires. Cela concerne les champs neutroniques de hautes énergies (>20 MeV), de haute intensité (comme pour la thérapie par capture de neutrons par le bore, BNCT, ou la fusion nucléaire) et pulsés.

Nouveaux défis et opportunités

En parallèle du travail visant à maintenir l'intégrité, la validité et la pertinence des CMCs des rayonnements ionisants, la communauté du CCRI a œuvré pour relever les nouveaux défis posés par la communauté des parties prenantes et se préparer aux évolutions de la métrologie. Lorsqu'un défi ou une opportunité est identifié, il est courant d'établir des groupes de travail ou (à plus court terme) des groupes spécifiques rassemblant des experts du monde entier.

Groupe de travail du CCRI sur l'imagerie quantitative et la thérapie par radionucléides

Ce groupe de travail a été créé fin 2019 afin d'examiner les questions métrologiques dans les domaines en rapide évolution de l'imagerie nucléaire quantitative et de la thérapie par radionucléides. Il rassemble plus d'une dizaine d'experts internationaux en métrologie des radionucléides et médecine nucléaire et a pour objectif de développer et promouvoir les bonnes pratiques concernant les mesures de radioactivité dans la pratique clinique de la thérapie par radionucléides, y compris en ce qui concerne l'imagerie quantitative et la dosimétrie.

Le groupe de travail a jusqu'à présent organisé trois webinaires du BIPM, dont un en particulier sur la coopération entre les laboratoires nationaux et désignés et les utilisateurs finaux. Ce webinaire a mis en contact des représentants d'un laboratoire national de métrologie avec la communauté des utilisateurs finaux (médecins, physiciens, organismes de réglementation) de trois pays différents, ce qui a permis d'avoir une meilleure vision des besoins de chaque partie et de mieux comprendre comment la coopération entre les communautés peut améliorer les soins apportés aux patients. Les retours concernant les trois webinaires ont été pris en considération pour élaborer le plan d'activité du groupe de travail pour les années à venir. Il s'agira notamment de développer deux documents

d'orientation : l'un (prévu pour le milieu de 2023) sur la façon d'établir et maintenir la traçabilité des mesures pour l'imagerie quantitative, en donnant notamment des directives spécifiques sur la préparation des fantômes et l'évaluation de l'incertitude, et l'autre sur les questions métrologiques liées aux nouvelles classes de thérapies fondées sur des émetteurs alpha.

Groupe de travail commun au CCRI et au CCEM sur les mesures de faibles courants

Le groupe de travail a été établi en 2019 en collaboration avec le CCEM afin d'étudier l'introduction de nouvelles technologies pour mesurer les faibles courants dans des chambres d'ionisation qui sont largement utilisées dans des applications médicales et de protection des rayonnements ionisants et qui sont au cœur des systèmes de référence des laboratoires nationaux de métrologie et du Système international de référence (SIR) du BIPM.

Au sein de la communauté de la métrologie électrique, le développement ces dernières années de pompes à électrons a accru l'intérêt porté à la métrologie des faibles courants. La nécessité de mesurer ces courants à des fins de recherche a permis de mieux comprendre les systèmes existants de mesure de faibles courants et d'en mettre au point de nouveaux. Cette nouvelle technologie offre un certain nombre d'avantages, comme celui de pouvoir remplacer la plupart des sources de radionucléides à longue durée de vie (par exemple le ^{26}Ra) par des systèmes à courant stable permettant de contrôler la stabilité des chambres d'ionisation.

Le groupe de travail, qui rassemble 18 experts des mesures électriques et de la métrologie des radionucléides, a pour objectif de mettre au point et de publier un guide des bonnes pratiques concernant l'utilisation des mesures de faibles courants pour les chambres d'ionisation.

Collaboration du CCRI et du CCQM sur la spectrométrie de masse en métrologie des radionucléides

Les méthodes de spectrométrie de masse sont utilisées depuis près de 25 ans par divers laboratoires comme un moyen de mesurer les radionucléides à longue durée de vie, en particulier dans le cas de matrices complexes. Toutefois, elles le sont de façon limitée dans le cadre de la métrologie des radionucléides (en particulier au niveau des laboratoires nationaux de métrologie). Le CCRI (en particulier la Section II) a engagé une collaboration avec le CCQM afin d'étudier comment la spectrométrie de masse pourrait répondre à certains besoins métrologiques dans des applications telles que le démantèlement et la décontamination de sites nucléaires / radiologiques, la surveillance et le contrôle de la pollution, la sécurité nucléaire et la criminalistique nucléaire, l'évaluation des impuretés et interférences (en particulier en médecine nucléaire thérapeutique et environnementale), et l'obtention de données critiques de décroissance nucléaire pour les radio-isotopes à très longue durée de vie.

Un travail initial a été effectué en organisant des réunions visant à présenter et comprendre les besoins et l'expertise des deux communautés, en lançant une enquête sur l'utilisation de la spectrométrie de masse dans la communauté du CCRI, et en mettant en place un webinaire pour comprendre le travail en cours dans certains des laboratoires nationaux et désignés ainsi que leurs futurs plans (y compris les propositions de recherche). Il est prévu d'organiser un atelier en février 2023 afin de rassembler les communautés du CCRI et du CCQM et de discuter des possibles utilisations et avantages, ainsi que des défis liés à l'extension de l'utilisation de la spectrométrie de masse par la communauté des radionucléides.

Groupe spécifique du CCRI sur les sources radioactives et les technologies alternatives

Un groupe spécifique a été mis en place par la Section I du CCRI en 2021 afin d'apporter des réponses à la charge réglementaire croissante qui pèse sur les sources de radionucléides de haute activité, éléments essentiels de l'infrastructure de la métrologie des rayonnements ionisants. Les contraintes réglementaires de plus en plus nombreuses pourraient rendre plus difficile l'obtention et/ou l'utilisation

de certains isotopes clés dans les laboratoires de métrologie, comme le souligne un rapport des académies nationales des sciences américaines sur ce sujet[19]. Au BIPM, les projets visant à avoir accès à la source de ^{137}Cs de l'AIEA plutôt que d'installer un équipement à Sèvres et les mesures mises en place pour diminuer les autres sources détenues sont une réponse à cette tendance à long terme. Le groupe spécifique a pour objectif de produire en 2023 un rapport sur les implications de ces difficultés et les options qui s'offrent à la métrologie des rayonnements ionisants puis de le soumettre au CCRI.

Communication

De 2020 à 2022, les contraintes que la pandémie de Covid-19 a imposé sur les activités en personne ont eu un impact sur le travail du CCRI, avec des annulations d'évènements et des réunions devant être organisées en ligne. Toutefois, la pandémie a aussi contribué au développement de nouvelles méthodes numériques de communication et de collaboration avec la communauté des rayonnements ionisants, ce qui a encouragé cette dernière à explorer de nouveaux outils de communication pour soutenir sa mission et à réviser son approche de la communication. Ainsi, une série de webinaires a permis de rassembler les parties prenantes et métrologistes du monde entier. Ces webinaires ont permis d'assurer un transfert des connaissances et de revoir l'état de l'art de domaines spécifiques ; ils ont constitué un forum où les parties prenantes ont pu partager les défis métrologiques auxquels ils sont confrontés et où les métrologistes ont pu présenter des solutions pour y faire face. Au total, 1 277 personnes venant de 89 États et Entités économiques ont participé aux 17 webinaires organisés.

Le CCRI a mis en place un Groupe de travail sur la communication afin de continuer à utiliser, entre autres, ces nouvelles méthodes (en personne et en ligne) pour soutenir le CCRI dans l'accomplissement de sa mission. En particulier, étant donné que les restrictions liées à la pandémie sont progressivement levées dans le monde entier, il est nécessaire de faire le point sur les avantages et les inconvénients des différents modes de communication, de formations et de réunions, en se demandant par exemple comment trouver le meilleur équilibre entre la participation accrue permise par les réunions virtuelles et la profondeur qui caractérise les échanges en face à face.

Perspectives à court terme et à long terme

Le CCRI, par ses activités de coopération directe et par le réseau de l'ensemble de ses membres, continue à suivre l'évolution des besoins de ses parties prenantes et de ses utilisateurs finaux. Le CCRI continuera à répondre aux défis, à embrasser les évolutions de la science et de la technologie métrologiques et à soutenir les laboratoires nationaux de métrologie qui cherchent à renforcer leurs aptitudes en métrologie des rayonnements ionisants.

Il est attendu que les activités suivantes, qui illustrent l'activité du CCRI depuis 2018, se poursuivent à court et moyen terme :

- le travail du Groupe du CCRI sur les CMCs en collaboration avec les organisations régionales de métrologie qui optimise la portée des CMCs dans le domaine des rayonnements ionisants et maximise leur valeur sans imposer à la communauté qui maintient ces CMCs une charge de travail déraisonnable ;
- le travail du Groupe de travail commun au CCRI et au CCEM sur les mesures de faibles courants et du Groupe de travail du CCRI sur l'imagerie quantitative et la thérapie par radionucléides ;
- le travail du Groupe spécifique du CCRI sur les sources radioactives et les technologies alternatives ;

[19] "Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies" 2021 report from the US National Academies of Sciences, Engineering and Medicine

- l'expansion du travail avec le CCQM sur l'application de la spectrométrie de masse en métrologie des rayonnements ionisants, y compris l'organisation d'un atelier en février 2023 ;
- le travail du Groupe de travail sur la communication pour exploiter les outils de communication, ceux existants comme ceux à venir, afin de soutenir la mission du CCRI.

Parmi les autres défis qu'il sera nécessaire de relever ces prochaines années figurent les suivants :

- Il sera nécessaire de comprendre les implications de la révolution numérique pour la métrologie des rayonnements ionisants et de coordonner l'introduction du cadre numérique du SI en métrologie des rayonnements ionisants. Les défis techniques porteront sur la façon d'intégrer le cadre numérique du SI à l'utilisation établie des technologies numériques en métrologie des rayonnements ionisants et aux applications des rayonnements ionisants, et sur la manière dont les membres du CCRI peuvent étendre l'utilisation des technologies de transformation numérique (comme les rapports de comparaison comprenant des données numériques, les certificats d'étalonnage électroniques) au service des communautés de parties prenantes. Le CCRI met en place un groupe de travail sur la transformation numérique afin de relever ce défi et d'assurer un lien avec le programme global du CIPM sur le SI. Ce groupe se réunira pour la première fois en 2023.
- À plus long terme, le CCRI prévoit un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire dans certains pays, ce qui pourrait conduire à des conceptions d'équipement innovants (comme un petit réacteur modulaire). Il existe également un certain nombre de programmes nationaux et internationaux visant à accélérer la transition de la production d'énergie par fusion de la R&D vers son application commerciale. Dans ces deux cas, un soutien métrologique sera nécessaire.

Les stratégies sont des documents vivants qui doivent refléter l'évolution d'un domaine au niveau mondial, ce qu'illustrent les exemples donnés précédemment. Ainsi, la stratégie du CCRI sera révisée à nouveau ces prochaines années, parallèlement au travail effectué par le CIPM pour élaborer une stratégie plus vaste et une vision en amont du 150e anniversaire de la Convention du Mètre en 2025.

Données sur le CCRI

CCRI créé en 1958 (CCEMRI, Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants de 1958 à 1999)

Président :	M. Sené
Secrétaire exécutif :	V. Gressier (S. Judge jusqu'en juin 2021)
Composition :	13 membres, 5 organismes de liaison et 10 observateurs
Liste des membres et observateurs :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccri/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	7 juin 2019, 8-10 juin 2021
Rapports complets des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccri/publications

Le travail du CCRI s'appuie sur trois « Sections » centrées chacune sur des aspects spécifiques de la métrologie des rayonnements ionisants :

- Section I Rayons x et gamma, particules chargées
- Section II Mesure des radionucléides
- Section III Mesures neutroniques

Huit Groupes de travail : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccri

- Groupe de travail commun au CCRI et au CCEM sur les mesures de faibles courants,
- Groupe de travail de la Section I sur les étalons en curiethérapie
- Groupe de travail sur la communication

- Groupe de travail de la Section I sur les comparaisons clés
- Groupe de travail de la Section II sur les comparaisons clés
- Groupe de travail sur les CMCs en collaboration avec les organisations régionales de métrologie
- Groupe de travail sur l'imagerie quantitative et la thérapie par radionucléides
- Groupe de travail *ad hoc* du CCRI sur la stratégie

Le président remercie M. Sené pour son rapport.

22. Rapport sur les finances du BIPM

M. Richard, président du Sous-comité du CIPM sur les finances, donne un rapport sur la gestion financière du BIPM au cours de la période de la dotation actuelle (2020-2023) et présente le budget proposé pour les années 2024 à 2027. Il souligne que la bonne gestion de la part du directeur et de son équipe, ainsi que les états financiers de 2020 et 2021 qui ont été soumis dans les délais impartis et audités, illustrent comment les finances du BIPM ont été gérées pendant la période de la dotation actuelle. Le rapport financier annuel du BIPM est approuvé par le CIPM, sur recommandation du Sous-comité sur les finances, et audité par un auditeur externe (KPMG).

M. Richard indique que la question de l'accumulation des arriérés a désormais été traitée. La pratique qui était en place jusqu'en 2012 a conduit à ne pas exclure des États en situation d'arriérés depuis plus de six ans. Ces États restaient dans une période illimitée de suspension au cours de laquelle ils ne bénéficiaient pas des avantages et prérogatives et étaient considérés comme accumulant des arriérés. Il a été mis fin à cette pratique, qui était en contradiction avec l'Article 6 du Règlement annexé à la Convention du Mètre, en 2013. Le CIPM estime que le montant total versé par chaque État Membre au cours de cette période était correct et aucune dette n'a été effacée. Le BIPM n'a pas reçu de montant excédant ce qui aurait dû être réglé, et les montants versés par les États Membres (non débiteurs) ont toujours été corrects. L'auditeur externe (KPMG) a validé cette conclusion et le CIPM a pris la Décision CIPM/111-08 (2022) qui met fin à cette question. M. Richard répète que la solution concernant cette question complexe n'a pas d'incidence sur les paiements effectués par les États Membres, ni sur les finances du BIPM.

M. Richard revient au thème de la gestion des finances au cours de la période couvrant la dotation actuelle (2020-2023) et observe que les résultats obtenus jusqu'ici sont meilleurs que le budget approuvé. Le programme de travail approuvé a été exécuté en totalité en respectant le budget. Cela est dû notamment à une approche stratégique planifiée concernant l'entretien des bâtiments du BIPM et les dépenses d'investissement, comme les logiciels et matériels informatiques. Du fait de la pandémie mondiale de Covid-19, des économies ont été réalisées par rapport au budget prévu concernant les réunions, voyages, transports et détachements : 697 000 euros en 2020 et 821 000 euros en 2021. Ces économies ont permis au CIPM d'effectuer un versement de 3 millions d'euros à la Caisse de retraite du BIPM.

M. Richard présente le budget proposé pour les années 2024 à 2027, en rappelant qu'il a été préparé par le directeur du BIPM et le Service Finances du BIPM. Il note que le plan financier à long terme proposé repose directement sur la stratégie du BIPM concernant son programme de travail. Le CIPM a précisé que les fonds seraient utilisés de manière efficiente en se fondant sur les quatre points suivants :

- des économies seront identifiées dans les dépenses de fonctionnement et d'investissement des laboratoires ;
- des installations hors site seront exploitées lorsque cela présente un avantage financier ;

- le recrutement de nouveaux membres du personnel en contrat de 5 ans sera privilégié ;
- le recours à des détachements sera favorisé à chaque fois que possible.

M. Richard présente brièvement les dépenses prévues pour 2024-2027, en notant que l'élaboration du budget repose sur un certain nombre d'hypothèses clés. Il a été considéré que l'augmentation annuelle de la masse salariale serait de 1,8 % afin de couvrir les promotions et avancements. Cette hypothèse est appliquée avant toute prise en compte de l'inflation. Les hypothèses concernant l'inflation annuelle appliquée aux salaires, allocations et dépenses de santé sont les suivantes : 3 % pour 2024 et 2025, puis 2 % pour 2026 et 2027. Les hypothèses concernant l'inflation appliquée aux services sous contrat et aux dépenses d'énergie sont les suivantes : 6 % pour 2024 et 2025, puis 4 % pour 2026 et 2027.

Des hypothèses concernant les besoins en personnel ont été émises pour la période 2024 à 2027 car ces dépenses représentent une part significative du budget. Les besoins supplémentaires en personnel générés par les activités de transformation numérique seront satisfaits par des gains d'efficacité dans le déploiement du personnel dans certains postes de soutien. Le plan de recrutement pour la période 2024 à 2027 permettra de corriger un certain nombre de départs à la retraite de personnes détenant des postes clés : il comprend des actions visant à réorganiser le fonctionnement et la structure organisationnelle du BIPM, afin d'augmenter l'efficacité de l'exécution du programme de travail, et poursuit la politique consistant à préférer le recrutement de personnel en contrat à durée déterminée. Par ailleurs, le CIPM examinera différentes options d'externalisation de certaines fonctions ainsi que de nouveaux accords de mobilité afin d'encourager les échanges de personnel entre le BIPM et les laboratoires nationaux de métrologie.

M. Richard précise que le CIPM a examiné les plans financiers à long terme et les hypothèses financières utilisées, ce qui l'a conduit à demander une augmentation de la dotation pour la période 2024 à 2027 de 1,5 % par an. M. Richard présente les montants de la dotation annuelle qui ont été inclus au Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » et rappelle aux délégués qu'ils auront la possibilité de poser de plus amples questions à ce sujet lors de la séance à huis clos qui sera organisée l'après-midi du 16 novembre pour les représentants des États Membres.

L'augmentation annuelle proposée de 1,5 % pour les années 2024 à 2027 comprend 1 056 000 euros pour mettre en place les nouveaux projets liés à la transformation numérique et pour accueillir des détachés à hauteur de 7,4 équivalents temps plein pour chaque année de la période de quatre ans. M. Richard souligne que la dotation proposée soutient une « croissance nette de zéro » et que le nombre de membres du personnel du siège du BIPM n'augmentera pas au cours de la période 2024 à 2027. Pour parvenir à une croissance nette de zéro tout en augmentant la dotation annuelle de 1,5 % dans une période de forte inflation, il sera nécessaire de faire des économies dans les dépenses de fonctionnement et d'investissements des laboratoires afin de les maintenir, pour la période 2024 à 2027, au même niveau (en termes nominaux) que pour la précédente période. En outre, des mesures d'économies d'énergie seront prises afin de réduire les dépenses d'électricité et de gaz nécessaires pour le chauffage des bâtiments et la climatisation.

M. Richard indique que le budget pour les années 2024 à 2027 a été élaboré sur la base d'hypothèses raisonnables et éclairées ; toutefois, ces hypothèses dépendent de l'inflation à venir, ce qui est difficile à prévoir. Un test de résistance a été effectué afin de déterminer ce qui se passerait si l'inflation est pire que les meilleures hypothèses utilisées et ce qui pourrait advenir si une augmentation annuelle de la dotation de 1,5 % n'est pas approuvée. De plus amples détails sur le test de résistance, les différentes hypothèses et leurs conséquences sont donnés dans le « Document de travail de la CGPM ».

Le président remercie M. Richard pour son rapport et indique que les délégués pourront poser des questions sur les finances lors de la séance à huis clos. Mme Chambon (France) remercie le CIPM pour sa vigilance lors de la préparation du budget, ainsi que le directeur du BIPM pour avoir présenté un budget raisonnable avec néanmoins un programme de travail ambitieux.

23. Présentation du programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027

M. Milton, directeur du BIPM, évoque les trois documents de préparation de la 27e réunion de la CGPM. Il cite notamment le « Document de travail de la CGPM, octobre 2022 », qui présente de façon synthétique les progrès réalisés concernant le programme de travail 2020-2023, les propositions concernant le programme de travail 2024-2027, et la dotation proposée pour les années 2024 à 2027. Le document « Projets proposés dans le programme de travail du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » présente les propositions de façon complète. Le plan financier du BIPM pour 2024-2027 a été développé par le directeur du BIPM et le président du Sous-comité du CIPM sur les finances puis examiné par le CIPM lors d'une réunion en ligne en mars 2022.

M. Milton explique le processus d'élaboration et de consultation suivi pour chacun des trois documents et indique comment il a collaboré avec le CIPM pour finaliser les documents. La première approche lors de l'élaboration du plan stratégique « Strategic Plan for the BIPM Work Programme (2022) » a été d'utiliser les éléments fournis dans les stratégies des dix Comités consultatifs et dans celle du CIPM afin de développer, en avril 2021, un projet de stratégie pour le programme de travail du BIPM. M. Milton ajoute que le développement des stratégies des Comités consultatifs a exigé du personnel des laboratoires nationaux de métrologie un investissement en termes de temps et que ces stratégies sont une ressource utile concernant de nombreuses applications, outre l'intérêt qu'elles ont eu lors de l'établissement de la stratégie pour le programme de travail. Le projet de stratégie a été examiné par le Sous-comité du CIPM sur la stratégie puis publié pour examen et commentaires. Le document final « Strategic Plan for the BIPM Work Programme (2022) » est ainsi soumis à la CGPM.

M. Milton indique que le point de départ de l'élaboration du plan stratégique « Strategic Plan for the BIPM Work Programme (2022) » a été de mettre en œuvre les objectifs du BIPM adoptés par la CGPM à sa 26e réunion (2018) dans la Résolution 3. Pour résumer, le BIPM a pour objectif de représenter la communauté métrologique internationale, d'être un centre de collaboration scientifique et technique, et de coordonner le système mondial de mesure en mettant en place les activités nécessaires, telles que la base de données du CIPM MRA. Les objectifs doivent être étayés par des actions dans le domaine du renforcement des capacités et du transfert des connaissances. M. Milton précise, qu'il a été convenu, dès le départ, que le développement du plan stratégique devait tenir compte de certains défis clés à relever. Il s'agit en particulier : des défis et possibilités que génère la transformation numérique dans tous les domaines du BIPM ; des opportunités identifiées dans les stratégies des Comités consultatifs ; du besoin continu de fonctionner selon une « nouvelle normalité » en ayant recours à de nouveaux mécanismes pour interagir avec les laboratoires nationaux de métrologie, les organisations régionales de métrologie et d'autres parties prenantes clés et d'utiliser ces outils et modes d'interaction pour améliorer autant que possible le travail du BIPM ; et de l'intégration des activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances dans toutes les composantes du programme de travail. Le projet de stratégie a été publié puis soumis pour commentaires en septembre et octobre 2021. Onze laboratoires nationaux de métrologie ont envoyé des commentaires et le BIPM a répondu à chacun pour expliquer comment la stratégie serait adaptée pour tenir compte des observations. Le document de stratégie a ensuite été examiné et approuvé par le CIPM.

L'élaboration du document « Projets proposés dans le programme de travail du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » a pris en considération les priorités suivantes : identifier les activités de la plus haute valeur requises par les États Membres ; examiner le travail technique nécessaire dans le domaine de la métrologie en physique au siège du BIPM suite à la décision de redéfinir les unités de base du SI adoptée par la CGPM à sa 26e réunion (2018) ; équilibrer les ressources affectées aux trois objectifs stratégiques (liaison, collaboration technique et coordination) avec des activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances et avec des activités liées à la transformation

numérique ; et élaborer un plan financier à long terme soutenable jusqu'en 2027. M. Milton souligne que le fondement des activités du siège du BIPM continuera d'être le travail effectué par le personnel dans les domaines de la liaison, de la coordination et de la collaboration technique, avec des activités techniques limitées à celles où le siège du BIPM joue un rôle spécifique et qui apportent un soutien direct à de nombreux États Membres, voire à tous. Le projet de document a fait l'objet d'une consultation en mai et juin 2022. Huit laboratoires nationaux de métrologie ont soumis des commentaires sur ce projet de programme de travail et le projet révisé a ensuite été proposé au CIPM pour approbation.

M. Milton indique que le document « Projets proposés dans le programme de travail du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » comprend 145 activités. Le siège du BIPM prévoit de pouvoir exécuter l'ensemble des activités présentées dans le document de consultation si l'augmentation annuelle de 1,5 % de la dotation est approuvée. M. Milton présente certains des projets majeurs du programme de travail pour chacun des départements. Le Département de la métrologie en physique continuera à coordonner la comparaison des réalisations primaires du kilogramme et à gérer la valeur de consensus pour la dissémination de l'unité de masse à partir des étalons de travail du BIPM. Le département poursuivra la mise au point d'un étalon de résistance de Hall quantifiée à base de graphène afin de réduire les coûts des comparaisons sur site et de simplifier les opérations de transport. Le Département du temps développera les meilleures méthodes de comparaison de temps et de fréquences afin d'intégrer de nouveaux étalons de fréquence optiques au calcul de l'UTC et afin de soutenir les progrès concernant la feuille de route pour la redéfinition de la seconde du SI. Il coopérera avec l'Union internationale des télécommunications (UIT) ainsi qu'avec d'autres organisations internationales et parties prenantes afin de définir un futur UTC continu, conformément au Projet de résolution D. Le Département de la chimie réalisera cinq nouvelles comparaisons sur demande d'étalons de mesure des gaz à effet de serre et des gaz ayant un impact sur la qualité de l'air ; il élargira la gamme de comparaisons de matériaux organiques des molécules de petite taille, ainsi que les activités de transfert des connaissances associées, aux anticorps monoclonaux. Le Département des rayonnements ionisants étendra ses services de comparaison, réalisés hors site, à un nouveau champ de rayonnements prioritaire afin de répondre à l'utilisation croissante de nouveaux faisceaux en radiothérapie. En outre, le département lancera un Système de référence international (SIR) de nouvelle génération pour des comparaisons de radionucléides émetteurs de rayonnement gamma à l'aide de nouvelles technologies de mesure des faibles courants, ce qui répondra aux besoins dans les domaines de la médecine nucléaire et de la surveillance de l'environnement.

M. Milton présente un graphique indiquant les objectifs de participation aux activités du BIPM, ainsi que des données historiques, pour le précédent programme de travail (2016-2019), l'actuel (2020-2023) et le prochain (2024-2027). Il note que la participation mesurée par le nombre de comparaisons coordonnées et d'étalonnages réalisés varie en fonction de chaque département. On observe une augmentation presque linéaire du nombre de comparaisons et d'étalonnages effectués par le Département de la métrologie en physique entre le précédent programme de travail et le prochain. Le défi pour le Département du temps ne concerne pas en premier lieu le fait d'intégrer de nouvelles horloges au système mais la façon d'étendre les activités de renforcement des capacités afin de soutenir les laboratoires qui participent pour la première fois au calcul de l'UTC, le but étant qu'ils puissent intégrer leurs données au système avec autant de facilité et d'exactitude que possible. Le Département de la chimie devrait continuer à voir les participations augmenter et on note une augmentation importante des nouvelles comparaisons d'isotopes du CO_2. Il est prévu que les participations augmentent concernant le Département des rayonnements ionisants ; les participations pour la période 2020-2023 ont souffert de la disponibilité limitée pendant 18 mois d'un équipement hors site en raison de la pandémie de Covid-19.

Le point clé du programme de travail proposé concernant les activités de coordination et de relations institutionnelles est d'explorer des modèles permettant de faciliter la participation des États qui ne prennent pas encore part aux activités du BIPM afin d'étayer le Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre ». Il s'agira d'effectuer des recherches sur la façon dont d'autres organisations s'engagent avec les États non-participants et de discuter avec les États Membres existants afin de déterminer comment avancer pour mettre en œuvre le Projet de résolution F. En outre, le BIPM continuera à collaborer avec l'UNESCO pour promouvoir la Journée mondiale de la métrologie en la faisant reconnaître officiellement comme un événement annuel de l'UNESCO. La décision de reconnaître officiellement la Journée mondiale de la métrologie devrait être ratifiée lors de la 42e session de la Conférence générale de l'UNESCO en novembre 2023. Dans les domaines de la communication et de la promotion, le BIPM s'attachera à s'assurer que le site internet continue à fournir des services efficaces et donne une image moderne du BIPM, notamment par le lancement d'un registre numérique externe reposant sur des identifiants numériques (DOIs) afin d'améliorer l'accessibilité par machine. Par ailleurs, le BIPM commencera à programmer des événements spéciaux pour célébrer le 150e anniversaire, le 20 mai 2025, de la signature de la Convention du Mètre.

Les besoins en matière de transformation numérique et de nouveaux services numériques ont rapidement évolué pendant l'élaboration du programme de travail. Les points clés sont le développement d'un ensemble de nouveaux services web de haute qualité qui assurent l'accès aux données fournies par le site internet du BIPM, tels que l'application des principes FAIR à la KCDB et le développement d'un point de référence du SI qui constituera une version numérique structurée de la Brochure sur le SI.

M. Milton précise qu'il est nécessaire, lors de l'élaboration du programme de renforcement des capacités et de transfert des connaissances (CBKT), de distinguer les activités « fondamentales » de renforcement des capacités qui sont financées par le programme de travail et les activités qui sont soutenues par des partenaires extérieurs. Les points clés du programme de travail proposé concernant les activités fondamentales CBKT comprennent le soutien au JCTLM par des ateliers et des détachements en laboratoire, ainsi que par le développement de matériaux d'apprentissage en ligne permettant d'accroître la qualité et la reconnaissance des tests cliniques de laboratoire dans le monde entier. Par ailleurs, le programme comprendra de nouvelles activités de soutien concernant la production d'une échelle de temps de référence internationale (UTC) afin d'augmenter la qualité des données et par là-même la qualité des échelles de temps, ainsi que des ateliers thématiques identifiés avec les organisations régionales de métrologie comme étant de la plus haute priorité dans les régions. M. Milton rappelle que la plateforme d'apprentissage en ligne héberge désormais du matériel de quatre des six organisations régionales de métrologie.

Les activités CBKT soutenues par des partenaires sont mises en place en fonction des objectifs et préférences du partenaire à l'origine d'une activité spécifique et comprennent des possibilités de détachements en laboratoire dans les départements du BIPM. La programmation des activités soutenues des partenaires se fait différemment si cela concerne le renforcement des capacités, où le détaché est le premier bénéficiaire de l'activité, ou le transfert des connaissances, où le détaché tire des avantages de son détachement et soutient également l'exécution du programme de travail du BIPM. Lors du programme de travail 2024-2027, le programme CBKT devrait concerner au minimum 440 membres de personnel de laboratoires nationaux ou désignés qui participeront à des formations ou ateliers. Les ateliers en ligne devraient rassembler près de 400 participants et la plateforme d'apprentissage en ligne 500. Le programme CBKT prévoit 67 détachements en laboratoire au siège du BIPM, ce qui équivaudra à 34 mois-personnes, et 40 dans des laboratoires nationaux ou désignés partenaires. M. Milton note que le BIPM coopère avec des laboratoires nationaux de métrologie qui souhaitent organiser des activités de renforcement des capacités en mettant à disposition du matériel de formation et des conférenciers.

M. Milton résume le programme de travail pour les années 2024 à 2027 en soulignant que les activités proposées sont ambitieuses et que leur réalisation dépend du travail effectué par des scientifiques invités et des spécialistes collaborant avec le personnel du BIPM. La participation de scientifiques invités réduit les coûts, apporte une expérience spécifique au moment nécessaire, insuffle des idées neuves et offre une plus grande souplesse en matière de personnel. On a constaté que les scientifiques invités apportent également une nouvelle éthique d'équipe dans les laboratoires, ce qui est très apprécié. Le projet de programme de travail inclut également des activités de renforcement des capacités et de transfert des connaissances dans tous les domaines, même si certaines ne pourront être réalisées que si le BIPM trouve des partenaires financiers parmi les laboratoires nationaux de métrologie, États Membres, organisations régionales de métrologie, ou d'autres organismes. De nouveaux projets permettront de procéder à la transformation numérique des services du BIPM afin de mettre en œuvre le programme de transformation numérique dirigé par le CIPM pour la communauté mondiale de la métrologie. Enfin, le BIPM continuera à assurer la collaboration scientifique et technique entre les États Membres, leur permettant de développer des aptitudes pour les comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés.

Le président remercie M. Milton et ouvre la discussion. M. Louw, président du CIPM, précise que la stratégie concernant le programme de travail du BIPM présentée par le directeur est distincte du document « Report on the actions taken by the CIPM towards a "CIPM Strategy 2030+" ». M. Mohamed Ahmed Al Mulla (Émirats arabes unis) observe que diriger par l'exemple dans le cas de la transformation numérique est une très bonne chose et demande comment la transformation numérique dans les laboratoires sera disséminée aux autres organisations nationales de métrologie. M. Milton répond que la politique suivie au sein de l'organisation et des laboratoires est de faire reposer la transformation numérique sur les membres du personnel des laboratoires. Le BIPM n'établira pas un groupe sur la transformation numérique qui ne soit pas en lien avec le personnel de laboratoire car la transformation numérique est une transformation des services dans l'ensemble du siège du BIPM. Les résultats de cette transformation seront disséminés par les Comités consultatifs.

24. Rapport de l'OIML sur les activités de liaison

M. Anthony Donnellan, directeur du Bureau international de métrologie légale (BIML), présente l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), organisation intergouvernementale mondiale dont le travail repose sur quatre piliers : développer des publications et réglementations techniques destinées à être adoptées par ses États Membres, harmoniser le système international de certification pour l'approbation des instruments de mesure, renforcer les capacités et les promouvoir auprès des économies dont le système métrologique est émergent, et s'engager à l'échelle internationale. M. Donnellan montre comment l'OIML prépare son avenir et celui de la métrologie à l'échelle internationale, en particulier la métrologie légale internationale.

L'OIML cherche à élaborer et à mettre en œuvre des normes plus adaptables, flexibles et adéquates, afin de répondre aux besoins des consommateurs et des industries en constante évolution. Cela est crucial dans un environnement en mutation permanente et rapide. Pour accomplir sa mission, l'OIML procède à des examens, révisions et renouvellements très fréquents de ses publications. L'OIML, afin d'asseoir son rôle dans le futur, demeurera l'organisme international à activité normative de premier plan et travaillera activement avec ses groupes de projet, comités techniques et parties prenantes.

M. Donnellan donne une vue d'ensemble des nominations approuvées au cours de la 57e réunion du Comité international de métrologie légale (CIML) en octobre 2022. M. Roman Schwartz a confirmé qu'il quitterait son poste de président du CIML à la 58e réunion du CIML en 2023. Le CIML a élu

président M. Bobjoseph Mathew, actuel second vice-président du CIML, pour un mandat de six ans qui débutera à la 58e réunion du CIML. M. Jaco Marneweck a été nommé président du Groupe consultatif sur les questions concernant les pays et économies dotés de systèmes de métrologie émergents (CEEMS AG) et M. Han Jianping vice-président. M. Sascha Eichstädt a été nommé président du Groupe de travail OIML sur la numérisation et M. Ping Yang vice-président.

La signature de la Déclaration commune d'intention sur la transformation numérique au sein de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité par l'OIML et ses organisation partenaires en mars 2022 constitue une étape supplémentaire dans la préparation de l'avenir de l'OIML. La déclaration commune oriente les efforts du Groupe de travail OIML sur la numérisation et indique la manière d'organiser l'infrastructure internationale de la qualité et ses priorités pour l'avenir. Cette déclaration permettra à l'OIML de mettre en œuvre les principes nécessaires pour transformer l'organisation et la façon dont elle élabore ses publications, du point de vue numérique. L'OIML adopte les principes FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable) afin d'encourager l'ouverture numérique, la communication et la conservation des connaissances et l'égalité d'accès à ces dernières. Le Groupe de travail OIML sur la numérisation est composé de 15 représentants des États Membres et des organisations internationales et régionales partenaires de l'OIML qui apportent leurs points de vue et leurs contributions sur la façon dont la transformation numérique de la métrologie légale doit évoluer et se perfectionner. Le Groupe de travail OIML sur la numérisation a pour mission de soutenir, coordonner et promouvoir l'harmonisation et la mise en œuvre internationales de la transformation numérique en métrologie légale.

M. Donnellan explique que la collaboration avec le BIPM est au cœur du travail effectué par l'OIML. Le document OIML D 1 « Systèmes de métrologie nationaux – Développement du cadre institutionnel et législatif » est désormais publié de manière commune par les deux organisations. Cette publication décrit le cadre à mettre en place par les États pour disposer de l'infrastructure nécessaire, ou recommandée, à l'échelle nationale. Les autres domaines de coopération entre l'OIML et le BIPM comprennent : la collaboration avec les organisations en matière de liaison ; les déclarations communes ; la promotion et le partage de ressources ; la Journée mondiale de la métrologie et les efforts pour la faire reconnaître comme Journée mondiale par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) ; la transformation numérique, en particulier concernant les travaux réalisés en commun en matière de métrologie physique et concernant les aspects légaux et de documentation en métrologie ; la déclaration commune ; et les questions organisationnelles, institutionnelles et de gouvernance. Les directions des deux organisations sont régulièrement en contact et le Groupe conjoint s'est réuni à plusieurs reprises afin de discuter de l'orientation stratégique, y compris des interactions avec l'infrastructure internationale de la qualité. M. Donnellan remarque que l'OIML collabore en permanence avec le Réseau international sur l'infrastructure de la qualité (INetQI) en assurant l'infrastructure informatique nécessaire à ses activités.

L'OIML et le BIPM s'engagent dans plusieurs activités destinées à accroître leur visibilité telles que la proposition commune OIML-BIPM de créer une Journée mondiale de la métrologie de l'UNESCO. Les organisations ont pu communiquer directement avec l'UNESCO et ses États Membres, par l'intermédiaire des représentants des ambassades et des missions permanentes, afin de défendre la proposition. L'OIML et le BIPM ont participé activement au Partenariat des Organisations internationales en faveur d'un processus de réglementation internationale efficace de l'OCDE. L'OIML a ainsi fourni des exemples de bonnes pratiques pour assister d'autres organisations internationales et s'est inspirée des bonnes pratiques proposées par les autres membres du groupe, qu'elle a ensuite appliquées à ses méthodes institutionnelles et de gouvernance.

M. Donnellan conclut sa présentation en rappelant que l'apprentissage en ligne est au cœur du travail de l'OIML, qui coopère avec le BIPM dans le cadre de nombreux projets. Cette interaction se retrouve dans le partage et le référencement mutualisé des ressources d'apprentissage en ligne ainsi que dans le travail

conduit avec les organisations régionales de métrologie et les organisations régionales de métrologie légale. L'élaboration d'un module d'apprentissage en ligne commun entre le BIPM et l'OIML sur le document D 1 a débuté. M. Donnellan donne la parole à M. Mathew, président élu du CIML.

M. Mathew indique qu'il est important de montrer la pertinence et l'impact du travail de l'OIML. Les normes internationales, par exemple, sont plus efficaces lorsqu'elles inspirent confiance et sont largement acceptées, inclusives et mises en œuvre par la communauté sur laquelle elles agissent. Il faut également montrer quel impact l'OIML peut avoir sur la vie quotidienne afin de renforcer la confiance dans le système métrologique en général et dans le cadre réglementaire qui lui est associé. L'adéquation renforcée de l'OIML avec les Objectifs de développement durable (ODD), notamment dans les secteurs de l'énergie propre et abordable, montre la pertinence du travail qu'elle effectue. L'OIML et le BIPM ont contribué à l'exercice de modélisation de fonctions métrologiques conduit avec l'ONUDI par la publication d'un indice applicable à l'infrastructure de qualité pour le développement durable (QI4SD). Cet indice tient compte de cinq critères (accréditation, politiques, normes, évaluation de la conformité, et métrologie) afin de mesurer l'importance et la valeur des investissements dans l'infrastructure de la qualité.

L'OIML cherche à promouvoir ses normes tout en les rendant plus accessibles et moins complexes, comme en témoigne le système de certification de l'OIML (OIML-CS), qui permet de certifier les rapports d'essais sur la base des recommandations de l'OIML, réduisant ainsi les obstacles au commerce. L'OIML va promouvoir l'adoption et la mise en œuvre de normes internationales au sein des organisations internationales et dans les domaines de l'infrastructure internationale de la qualité et encouragera ses Membres à faire de même. L'OIML consultera les acteurs du secteur et les parties prenantes afin de recevoir des commentaires sur ses normes, pour savoir lesquelles sont essentielles, accessibles, et lesquelles doivent être révisées ou consolidées. Ces approches doivent permettre de démontrer l'aptitude de la métrologie à contribuer et à donner forme à des politiques, législations et règles internationales, ainsi que l'aptitude de la communauté de la métrologie à devenir un partenaire actif et de confiance dans ce dialogue.

M. Mathew résume son intervention en indiquant que l'OIML a pour objectif de mieux faire connaître sa contribution à l'infrastructure de la métrologie légale afin d'attirer de nouveaux membres. L'OIML souhaite accroître sa coopération avec les autres organisations internationales, parmi lesquelles le BIPM, l'ISO, l'IEC et l'ILAC. L'OIML-CS permettra de continuer à promouvoir la confiance mutuelle. L'organisation défendra les échanges d'expertise technique avec les économies émergentes et contribuera à faire avancer les projets de transformation numérique de la métrologie légale. Le travail de l'OIML s'articulera autour de la prise en considération des ODD. M. Mathew conclut en mettant l'accent sur le rôle central de la communauté de l'OIML sur les questions du commerce international, de la protection des consommateurs et du développement durable. En travaillant main dans la main, le BIPM et l'OIML peuvent mettre en avant l'importance de leur travail et aller plus loin.

Le président remercie M. Donnellan et M. Mathew et demande s'il y a des questions.

M. Laiz (Argentine) salue la création du Groupe de travail de l'OIML sur la numérisation. Il ajoute que la façon dont la transformation numérique et le passage à des services de cloud vont affecter l'évaluation et la vérification des instruments représente un défi important pour la métrologie légale. Au sujet de la coordination entre l'OIML et l'ISO, il fait remarquer que les différences potentielles entre les normes de l'ISO et les recommandations de l'OIML peuvent poser problème aux laboratoires nationaux de métrologie qui doivent évaluer leurs instruments. Il demande s'il est prévu de coordonner les recommandations de l'OIML et les normes de l'ISO concernant les instruments.

M. Donnellan répond que le travail de transformation numérique de l'OIML s'effectue « depuis la base ». L'OIML a pour objectif de rendre ses normes pertinentes pour l'industrie, les professionnels et les organismes de réglementation concernés, en s'assurant qu'elles soient lisibles et exploitables par machine

et disponibles dans le cloud. Cet objectif exige de tenir compte d'aspects tels que la vérification directe et, à l'avenir, le réétalonnage des instruments de mesure à l'aide de cette fonctionnalité. L'OIML s'intéresse à toutes ces notions à travers le prisme de la transformation numérique. M. Donnellan ajoute que l'habitude de produire de simples documents au format PDF ou XML doit être dépassée. Échanger directement des données qui comprennent l'auto-vérification et l'auto-étalonnage sera absolument nécessaire à l'avenir. Ce travail devra à tout prix s'accompagner de mécanismes de contrôle.

M. Mathew ajoute que la transformation numérique tiendra compte des évolutions techniques au sein de chaque économie et souligne l'importance de solliciter la participation de toutes les parties prenantes afin de permettre de définir des priorités. Trouver la bonne équipe et constituer éventuellement des sous-groupes pour résoudre des difficultés spécifiques représentent des défis pour le président du Groupe de travail OIML sur la numérisation. Concernant la seconde question qui a été posée, M. Mathew répond que s'assurer de l'absence de doublons et de l'harmonisation avec les normes non seulement de l'ISO, mais également des autres organisations partenaires de l'OIML, comme l'IEC, représente toujours un défi. L'OIML invite l'ISO comme les autres organisations à prendre contact avec elle lors de l'élaboration de nouvelles normes et régulations techniques. M. Mathew ajoute qu'il s'agit là d'une opportunité d'harmoniser, de rationaliser et de potentiellement réduire le nombre de normes en vigueur. L'OIML en tant qu'organisation, comme ses groupes de travail et leurs présidents, doivent impérativement encourager toutes les parties prenantes à contribuer à l'effort collectif. Au niveau de la direction, cette collaboration prend la forme d'une réunion annuelle quadripartite entre le BIPM, l'OIML, l'ILAC et l'ISO qui est l'occasion d'échanger différents points de vue sur des questions stratégiques. L'accent est mis sur la collaboration au niveau des comités opérationnels et techniques.

M. Donnellan ajoute que des améliorations peuvent toujours être apportées.

25. Normalisation, industrialisation et objectifs de développement durable de l'ONU

M. Yuko Yasunaga, directeur de la direction des services et des opérations de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), explique que le monde est fait de défis et que les relever exige de s'intéresser à la réalité de ces défis. Aujourd'hui, il est de la responsabilité des innovateurs de relever de nombreux défis sociétaux tels que le réchauffement climatique, la pollution de l'environnement, la pauvreté et la malnutrition dans certains pays, la sécurisation de l'approvisionnement en nourriture, en eau et en énergie, le maintien de la paix, la prévention des maladies infectieuses, etc. Nombre de ces problèmes résultent de « défaillances de marché », c'est-à-dire de situations où « la main invisible échoue ». Les Nations Unies ont adopté une approche pour relever les défis sociétaux dans le cadre du Programme de développement durable à l'horizon 2030. Elle comprend des objectifs de développement durable (ODD) adoptés en 2015 lorsque le besoin d'un nouvel outil pour relever ces défis est devenu manifeste. Dix-sept objectifs de développement durable rassemblent 169 cibles différentes. Sept ans se sont écoulés depuis l'adoption des ODD et il reste près de huit ans pour les accomplir d'ici à 2030.

M. Yasunaga présente la situation de certains ODD spécifiques. En 2016, sur le plan de la faim dans le monde, un grand nombre de personnes souffraient encore de malnutrition sévère. De nombreux pays, particulièrement d'Afrique, comptent 40 à 60 % de leurs habitants en situation de sous-nutrition. Si, en 2015, 181 pays avaient plus de 75 % de leur population pouvant accéder à l'eau potable, de nombreux pays d'Afrique subsaharienne et certains pays asiatiques, dont le Myanmar et le Cambodge, disposaient encore d'un faible niveau d'accès à l'eau potable. En 2018, 29 pays comptaient moins d'un habitant sur deux ayant accès à l'électricité. Parmi ces 29 pays, 27 sont situés en Afrique subsaharienne.

Accroître la protection de l'environnement est une priorité absolue pour l'ONUDI comme pour le monde entier. Les pays en développement ont connu une forte croissance économique et démographique ainsi qu'une forte densification de leurs villes, qui conduit notamment à des problèmes de gestion des déchets. Certaines politiques industrielles peuvent menacer l'environnement voire le détruire à grande échelle : l'assèchement quasi-total de la mer d'Aral est le résultat d'une sur-irrigation des cultures, due à une politique menée par l'Union Soviétique destinée à augmenter sa production et ses importations de coton. L'élimination progressive des hydrofluorocarbures (HFC) et des hydrochlorofluorocarbures (HCFC) ainsi que l'abolition de l'utilisation du mercure dans l'industrie, conformément à la convention de Minamata, représentent d'autres défis.

M. Yasunaga revient sur les raisons pour lesquelles l'ONU promeut les objectifs de développement durables de la façon dont il le fait. L'ONU a appris d'expérience que les méthodes conventionnelles d'aide au développement ne résolvent les problèmes ni qualitativement ni quantitativement. Cependant, les objectifs définis doivent attirer l'attention des investisseurs et, au fur et à mesure que des investissements sont réalisés, une solution au problème doit être trouvée. La réalisation des ODD à l'aide de fonds d'origine privée exige d'aborder la question sous une perspective différente. Le changement de paradigme consiste ici à passer de la responsabilité sociétale des entreprises à une démarche plus axée sur le monde des affaires. Selon cette approche, il est désormais acceptable que les entreprises privées génèrent des profits par leur contribution à la réalisation des ODD. Elle peut également conduire à la création de nouvelles opportunités et de nouveaux secteurs commerciaux. Au Japon s'est développée une philosophie commerciale appelée « Sanpo-yoshi », ou triple satisfaction : « bénéfique pour le vendeur (lucratif), bénéfique pour l'acheteur (pratique) et bénéfique pour la société (bien-être collectif) ». M. Yasunaga explique que l'ajout d'un nouveau critère pourrait être nécessaire, celui d'être « renouvelable » ou « bon pour l'avenir ».

M. Yasunaga expose les obstacles potentiels empêchant de relever ces défis et fait particulièrement référence aux pays d'Afrique. Dans de nombreux pays en développement, y compris en Afrique, les transferts de technologies sont soumis à des contraintes plus lourdes que dans les pays développés, toutefois, ces défis sont également source de nombreuses opportunités. Peut-être serait-il possible de simplifier, sinon dupliquer les expériences menées par le passé dans les pays développés pour créer de nouveaux modèles économiques et systèmes sociaux qui fonctionnent simplement en Afrique comme dans les autres pays en développement. M. Yasunaga prend l'exemple du défi que représente la mise en place d'une production d'énergie solaire dans les villages d'Afrique qui n'ont pas accès à l'électricité. Cela représente des défis technologiques et il est nécessaire de déterminer les heures et l'intensité de l'ensoleillement. Les défis sont également commerciaux, avec comme solution envisagée le micro-paiement de l'électricité à l'aide de smartphones pour simplifier la facturation. Le défi est enfin sociétal en ce qu'il demande de construire un système viable pour tous. M. Yasunaga résume brièvement les conceptions stéréotypées selon lesquelles « le Japon n'innoverait pas », tout comme d'autres pays du monde, ce qui constituerait un obstacle potentiel empêchant de relever ces défis.

M. Yasunaga explique que la métrologie est un outil indispensable pour surmonter les défis des ODD. De nouvelles technologies et méthodes de mesure sont essentielles pour le développement et la maintenance des nouvelles infrastructures. Le développement de l'industrie s'appuie également sur les technologies de mesure. L'élaboration de nouvelles méthodologies de mesure s'appuie sur les nouvelles technologies, dont l'évolution est guidée par les besoins en matière de méthodologie, ce qui accroît la précision des mesures. Les nouvelles technologies et méthodologies métrologiques peuvent aider à se familiariser avec des produits et des services nouveaux. M. Yasunaga donne un exemple du rôle joué par la métrologie dans le développement de nouvelles infrastructures énergétiques, en se concentrant sur la filière de l'hydrogène. Les pays ensoleillés et venteux, comme c'est le cas de nombreux pays d'Afrique méridionale et subsaharienne, ont le potentiel de devenir le « moteur » de la

filière hydrogène mondiale. La métrologie a un rôle déterminant dans l'évolution du secteur de l'hydrogène car la précision des mesures de volume, de température, de pression et de débit est indispensable pour assurer une transition sûre vers l'hydrogène et sa manipulation sans danger. Les technologies naissantes appliquées au secteur de l'hydrogène forment les fondations de potentielles nouvelles industries de l'énergie qui pourraient offrir des emplois à de très nombreux jeunes. Le rôle de la métrologie dans la résolution du problème de la pollution plastique des océans à l'aide de plastiques biodégradables constitue un autre exemple. L'objectif de réduction de la pollution des océans par les plastiques exige de déterminer une méthode normalisée de mesure de la biodégradabilité. Il est également nécessaire de normaliser une méthode d'accréditation qui permette aux consommateurs de s'assurer qu'un sac plastique est bien biodégradable.

L'ONUDI met en avant la place de la métrologie dans le développement industriel des pays en développement et des économies émergentes. Elle a notamment organisé une école de métrologie légale donnée par l'AFRIMETS en Tunisie, ainsi que la première école de métrologie destinée aux pays africains qui s'est tenue au Kenya. L'ONUDI a conclu un partenariat stratégique avec le BIPM et l'OIML. Pour l'édition 2017 de la Journée mondiale de la métrologie, elle a publié une brochure intitulée « Le rôle de la métrologie dans le contexte des objectifs de développement durable à l'horizon 2030 ».

M. Yasunaga rappelle enfin que la métrologie doit poursuivre ses collaborations, y compris avec les autres domaines. Cette collaboration au-delà des secteurs permettra à de nombreux chercheurs et visionnaires de différents secteurs technologiques d'interagir de manière pertinente et de surmonter collectivement le défi des ODD. Un seul message à retenir : « travaillons ensemble ».

Le président remercie M. Yasunaga et demande s'il y a des questions.

M. Pinto (Italie) demande dans quelle mesure l'égalité des sexes est prise en considération pour relever certains des défis posés par les ODD et si les inégalités liées au sexe représentent une urgence mondiale de plus. Il ajoute que l'égalité des sexes devrait pouvoir acquérir le même statut d'urgence mondiale que la question de la faim par exemple. M. Yasunaga répond que l'égalité des sexes est un des ODD *[Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et filles*]. Chaque ODD est élaboré sous l'angle de l'égalité des sexes, celle-ci est prise en compte de la phase d'innovation jusqu'à la phase de développement des méthodologies. La réduction des inégalités liées au sexe revêt la même importance pour tous les objectifs de développement durable. M. Yasunaga donne deux exemples de la nature vitale pour l'égalité des sexes de l'accès à l'eau potable et à des sanitaires. Dans de nombreux pays en développement, les femmes et les enfants doivent parcourir de longues distances pour s'approvisionner en eau. Ce problème pourrait être résolu en améliorant l'accès à l'eau potable. Il est également primordial que les écoles disposent de sanitaires adaptés pour encourager les femmes à s'y rendre et améliorer leurs opportunités d'éducation.

M. Flandrin remarque que la transformation numérique entraînera des conséquences sur l'ensemble de la société et demande s'il existe une méthode pour évaluer et comparer les effets de l'utilisation des technologies numériques et si la métrologie doit s'y intéresser pour jouer un rôle d'unification. M. Yasunaga répond que la transformation numérique offre aux pays en développement une chance de promouvoir rapidement leurs industries mais cela exigera du temps d'éducation et de formation. L'ONUDI souhaite promouvoir l'éducation et la formation dans le domaine de la transformation numérique afin que les pays en développement ne ratent pas l'opportunité de développer leurs secteurs qui évolueront grâce au numérique.

26. Rapport sur les progrès effectués concernant la reconnaissance par l'UNESCO de la Journée mondiale de la métrologie

M. Rysbek Alibekov, représentant de l'ambassade du Kazakhstan à Paris, déclare que le Kazakhstan, avec le soutien des équipes du BIPM, a eu le plaisir de soumettre à la 215e réunion du Conseil exécutif de l'UNESCO la proposition de faire de la Journée mondiale de la métrologie une Journée mondiale de l'UNESCO. Obtenir le soutien du Conseil exécutif de l'UNESCO au cours de cette réunion a constitué une étape décisive clé et une décision doit être adoptée par la Conférence générale de l'UNESCO en novembre 2023.

M. Alibekov remercie M. Milton, M. Donnellan, Mme Guliyeva, M. Henson et M. Kuanbayev pour leur soutien et leur aide précieuse. Au cours de la campagne destinée à rassembler des soutiens concernant cette initiative, la question a été posée plusieurs fois de savoir pourquoi le Kazakhstan est à la tête de cette initiative.

Tout d'abord, l'économie et la société du Kazakhstan ont connu de profondes transformations depuis l'indépendance. L'alignement de l'infrastructure métrologique nationale avec le cadre métrologique mondial, conduit par le BIPM et l'OIML, est l'un des principaux facteurs de l'émergence de l'économie nationale sur la scène mondiale.

Ensuite, le programme national de développement de l'industrie et de l'innovation du Kazakhstan a permis de créer une infrastructure métrologique nationale comparable et reconnaissable partout dans le monde.

Aujourd'hui, alors que le Kazakhstan prend part aux activités du BIPM et de l'OIML, il faut souligner combien le système métrologique kazakh contribue aux résultats économiques du pays et améliore la qualité de vie de ses concitoyens. Cela montre l'importance de la métrologie pour une économie et son peuple.

Le 20 mai 1875 est une journée symbolique pour le monde entier. Des nations se sont réunies et ont signé la Convention du mètre, formalisant une coopération internationale en matière de science et de mesures. L'importance de la métrologie reste toutefois trop peu reconnue en dehors des communautés de spécialistes.

Au nom de Son Excellence Mme Gulssara Arystankulova, ambassadrice de la république du Kazakhstan en France, M. Alibekov félicite tous ceux impliqués pour le travail productif qui a été accompli et qui a été couronné de succès.

Le président remercie M. Alibekov pour cette initiative.

M. Louw remercie M. Alibekov au nom de l'organisation, ainsi que les délégués qui ont fait avancer cette initiative et qui l'ont portée devant l'UNESCO pour le BIPM. Tous les regards se tournent désormais vers l'adoption finale par l'Assemblée générale de l'UNESCO, qui devrait avoir lieu en 2023. M. Louw remercie également les délégués qui ont mobilisé leur gouvernements, ainsi que les nations qui ont soutenu l'initiative.

27. Présentation du Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre »

M. Alan Steele et Mme Angela Samuel présentent ensemble le Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre ».

M. Steele débute sa présentation en rappelant que le principe d'adhésion universelle est inscrit dans le texte de la Convention du Mètre, comme le souligne la devise de 1799 « *à tous les temps, à tous les*

peuples ». La Convention du Mètre incarne cet idéal de participation universelle dans son préambule, « […] *les Hautes Parties contractantes désirant assurer l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique* […] » *;* cette universalité a été encouragée et facilitée au fil des années par les résolutions de la CGPM et l'action du CIPM. En outre, la Résolution 1 (2018) de la CGPM *«* Sur la révision du Système international d'unités (SI) *»* a constitué un changement idéologique et scientifique fondamental : en principe, tous les États ont désormais accès aux réalisations des unités, ce qui devrait encourager une participation universelle à un système désormais universellement accessible.

Les efforts pour faire progresser la participation ont été couronnés de succès, en particulier depuis le lancement du CIPM MRA en 1999. Au début du 21e siècle, on comptait 48 États Membres ; en novembre 2022, ils sont au nombre de 64 et représentent 93 % du PIB mondial, tandis que les 36 États et Entités économiques Associés représentent 4,7 % du PIB mondial. Cependant, d'autres pays sont impliqués dans la métrologie mondiale sans être toutefois des États représentés. M. Steele rappelle que dix des pays ayant apporté leur soutien à la demande pour faire reconnaître la Journée mondiale de la métrologie par l'UNESCO ne sont ni États Membres ni Associés, ce qui démontre nettement l'intérêt d'une plus grande accessibilité. Parmi les États Membres de l'ONU, 83 ne participent pas du tout aux activités du BIPM et représentent 2,3 % du PIB mondial. L'intégration de ces États ne constituerait qu'une faible contribution au budget du BIPM, tout en entraînant pour le BIPM des coûts limités. L'objectif est de favoriser la participation de tous, tout en rappelant que les privilèges et les obligations de chacun doivent être équitables. De nombreuses organisations internationales appliquent à leurs membres un système différencié concernant les contributions et droits associés.

Mme Samuel félicite le CIPM de soumettre le Projet de résolution F. L'objectif principal du projet de résolution est de faciliter l'inclusion de tous les États dans le système international, en effectuant une analyse en profondeur de ce qui répond au mieux au contexte des États et à leurs besoins. La participation au système international permet de renforcer les aptitudes nationales de mesure, ce qui aide notamment les gouvernements à constituer une force de travail qualifiée dans le domaine technologique, à garantir des aptitudes de mesure adéquates, à prendre part de façon efficace aux échanges internationaux, à répondre à des besoins sociétaux, à protéger les consommateurs et améliorer leur qualité de vie, à développer des compétences pour relever les défis émergents et à tirer parti des opportunités offertes par les progrès scientifiques et technologiques.

Participer efficacement au système international de mesure et à l'infrastructure de la qualité au sens large peut aider les pays et les économies dont le système métrologique est émergent à répondre à leurs besoins essentiels, ces pays s'efforçant d'atteindre les objectifs de développement durable à l'horizon 2030 fixés par les Nations Unies. Cela permet également de bénéficier des partenariats stratégiques déjà conclus par le BIPM avec des organismes mondiaux clés. Outre les avantages qu'apporterait une adhésion universelle à la Convention du Mètre aux États qui ne font pas partie du système international de mesure actuellement, une plus large participation à la communauté métrologique internationale serait profitable à l'ensemble des pays. Favoriser la prise en considération de perspectives diverses, et donc multiplier les opportunités de contributions innovantes, constitue un atout inestimable pour garantir l'efficacité et la pertinence du système international de mesure. Mme Samuel conclut sa présentation en soulignant que l'état de santé d'un système peut être mesuré à sa capacité à apprendre, s'adapter, écouter et donner la parole à une diversité de voix.

M. Steele indique que le vote par les délégués de la CGPM concernant le Projet de résolution F n'a pas pour objectif de mettre en œuvre immédiatement l'adhésion universelle. Le but est de confier au CIPM la mission d'étudier les pratiques des autres organisations internationales en matière d'adhésion, d'examiner l'application actuelle de l'Article III de la Convention du Mètre et de déterminer comment mettre en œuvre cet Article afin d'élargir l'adhésion. M. Steele souligne que le projet de résolution ne

vise en aucun cas à modifier la Convention du Mètre. L'objectif est d'examiner comment le texte existant peut être mis en œuvre pour parvenir à une adhésion plus large. Les conséquences d'une participation plus large sur le programme de travail et les services du BIPM devront ensuite être analysées. Le CIPM sera invité, au cours de la 28e réunion de la CGPM, à proposer des changements appropriés sur la manière de procéder collectivement afin d'intégrer le monde entier à la Convention du Mètre.

Le président remercie M. Steele et Mme Samuel et demande s'il y a des questions ou des remarques.

Mme Chambon (France) observe que le Projet de résolution F est conforme à l'esprit de la Convention du Mètre : il est essentiel qu'un tel traité scientifique rassemble une large participation. Le Projet de résolution F constitue une très bonne initiative étant donné l'importance d'inclure d'autres pays pour garantir la dissémination la plus vaste possible du Système international.

M. Louw ajoute qu'il est originaire d'un pays en développement et que la question de l'adhésion universelle présente un intérêt immense pour l'Afrique. Au sein de l'AFRIMETS, 34 des pays membres font partie des 83 États Membres de l'ONU n'ayant pas signé la Convention du Mètre. M. Louw remercie Mme Samuel et M. Steele. Ce dernier salue l'enthousiasme et le travail de M. Henson lors de la préparation du Projet de résolution F.

Quatrième séance – 17 novembre 2022 (matin)

Le président de la réunion souhaite la bienvenue aux délégués pour la quatrième séance.

28. Rapport du président du CCL

M. Ismael Castelazo, président du Comité consultatif des longueurs (CCL), présente son rapport sur les activités du CCL depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCL

Le CCL est responsable des questions concernant la définition et la réalisation du mètre, les mesures de longueur et d'angle, et la métrologie des coordonnées. Le CCL apporte également des conseils au CIPM dans le domaine de la métrologie des longueurs. En outre, le CCL est responsable de la mise en œuvre, dans le domaine des longueurs, de certains aspects du CIPM MRA, l'arrangement par lequel les laboratoires nationaux de métrologie reconnaissent mutuellement leurs mesures. Le CCL maintient un portefeuille de comparaisons clés qui a été optimisé afin de couvrir la gamme la plus large possible de CMCs. Pour ce faire, le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA a travaillé sur un vaste ensemble de documents d'orientation, protocoles de comparaison et modèles de rapport qui sont en libre accès. Le Groupe de travail du CCL sur la nanométrologie dimensionnelle a été très actif en termes de comparaisons visant à soutenir ce domaine, avec plusieurs comparaisons clés réalisées et d'autres en cours. Le domaine des longueurs a une incidence majeure sur la plupart des activités humaines actuelles ; le CCL veille à ce que les besoins de la société, de la recherche et de l'industrie soient satisfaits, en établissant des collaborations avec les organisations et communautés d'utilisateurs pertinentes. Concernant les perspectives d'avenir, le CCL s'oriente vers de nouveaux domaines avec pour objectifs de développer la nanométrologie dimensionnelle en 3D, soutenir le passage de l'industrie au balayage de surface sans contact (secteurs de la santé et de l'énergie), étendre la traçabilité de la métrologie en 3D à des dimensions plus grandes (aérospatiales, ingénierie civile de précision), compenser les effets d'indice de réfraction et les effets thermiques à différentes échelles, et résoudre les problèmes de traçabilité aux échelles nanométrique et subnanométrique (sciences avancées). La transition vers des mesures intégrées au processus de fabrication représente un changement de paradigme, qui s'écarte du rôle traditionnellement joué par les laboratoires d'étalonnage. Le CCL est très engagé dans le projet de transformation numérique et travaille en collaboration avec le BIPM afin de soutenir les laboratoires nationaux de métrologie dans leur tentative de mettre au point des certificats d'étalonnage numériques traçables à la mise en pratique du mètre et de la seconde (Valeurs recommandées des fréquences étalons). Ces nouveaux domaines et les nouveaux besoins qu'ils feront naître augmenteront la charge de travail du CCL et de ses membres dans les années à venir.

Domaine de compétence du CCL

Les activités du CCL comprennent les mesures pratiques de longueurs et d'angles (d'une seule dimension jusqu'à la 3D et de l'échelle subnanométrique jusqu'à des dizaines ou centaines de mètres) et les futurs étalons optiques de fréquence (pour la réalisation du mètre). Le travail du CCL peut également porter sur des questions connexes telles que la science des surfaces à l'échelle nanométrique, les propriétés thermiques des artéfacts et instruments, la compensation de l'effet de réfraction pour la propagation des faisceaux optiques, la physique des lasers, l'optique, l'instrumentation,

l'interférométrie, la conception mécanique, les logiciels mathématiques et le traitement de données, ainsi que la modélisation avancée. Ainsi, certaines activités du CCL recoupent celles de onze des quinze domaines techniques du Versailles Project on Advanced Materials and Standards (VAMAS) : une collaboration plus étroite avec le VAMAS est donc envisagée.

Stratégie

Afin d'assurer le plus haut niveau d'efficacité, le CCL est soutenu par quatre groupes de travail. Le Groupe de travail sur la stratégie supervise de façon régulière la révision de la stratégie du CCL et des documents associés ; il rassemble et rend disponibles les informations démontrant l'importance continue de la métrologie des longueurs. Le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle a pour mission d'harmoniser les voies de traçabilité, la terminologie et les étalons de référence pour les utilisateurs des nanosciences. Le Groupe de travail sur le CIPM MRA assure la coordination des comparaisons clés et supplémentaires du CCL et des organisations régionales de métrologie. Il maintient des liens avec les organisations régionales de métrologie afin de s'assurer de la participation des laboratoires membres du CCL dans les comparaisons importantes dans le domaine des longueurs, ce qui permet de garantir la traçabilité et l'équivalence mondiales des mesures de longueur au plus haut niveau d'exactitude, et il facilite le processus d'examen interrégional des CMCs. Par l'intermédiaire du Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence, le CCL coordonne le travail sur les nouvelles réalisations du mètre à l'aide d'étalons optiques de fréquence. Le CCL a mis en place un certain nombre de groupes de discussion techniques, ouverts à des participants qui ne sont pas membres du CCL, où des spécialistes discutent des nouveaux étalons et des questions liées aux comparaisons clés, des récents progrès scientifiques et des principales activités de recherche en cours, aux niveaux régional et international, dans le but d'optimiser l'échange d'informations et de soutenir la recherche coopérative.

Un nouveau Groupe spécifique du CCL sur la transformation numérique a été créé afin de débattre du format des données de fréquence laser soumises au Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence, en tenant compte des besoins du projet de mètre numérique du SI.

En 2018, le CCL a révisé sa stratégie afin de prendre en considération les besoins actuels et à venir en métrologie des longueurs. Les conclusions du document de stratégie identifient de façon synthétique deux exigences générales pour les années à venir :

- anticiper les besoins à venir en termes d'instrumentation, de normalisation et de traçabilité dans les domaines émergents scientifiques et industriels, sur une grande variété d'échelles de longueur et selon diverses conditions de mesure ;
- atteindre l'efficacité maximale dans la mise en œuvre des procédures du CIPM MRA afin de réduire les coûts incombant aux laboratoires de métrologie dans toutes les régions tout en contribuant à assurer la reconnaissance mutuelle.

Futurs objectifs scientifiques

Les mesures dimensionnelles, traçables au mètre du SI, étayent dans le monde entier les secteurs de la fabrication, de l'assemblage et de la construction, de l'échelle du nanomètre (nanosciences) à l'échelle macroscopique du mètre (industrie automobile, santé, ingénierie de précision) et au-delà (aérospatiale, construction navale, relèvements pour la cartographie). Les entreprises impliquées dans le commerce international sont particulièrement attentives à la question de la traçabilité, en particulier lorsqu'elles s'approvisionnent dans le monde entier en composants et assemblages. Bien que la métrologie dimensionnelle traditionnelle constitue un domaine mature et bien établi et que la révision du SI sur le CCL ait eu un impact minimum sur le travail du CCL, les demandes des clients externes et les grands défis à relever (concernant la qualité de vie, les besoins énergétiques, la santé et l'environnement) définissent le programme de recherche des membres du CCL.

1. Continuer à améliorer et élargir l'accès aux réalisations pratiques du mètre

Il est nécessaire d'étudier, aux échelles nanométrique et subnanométrique (où les longueurs d'onde des étalons optiques de fréquence sont « trop grandes »), de nouvelles voies de traçabilité au mètre du SI tout en continuant les recherches en cours sur les réalisations du mètre par des mises à jour de la liste des fréquences étalons. Cela permettra d'améliorer l'exactitude des mesures et la traçabilité dans le domaine de la nanométrologie dimensionnelle, ce qui diminuera la dépendance de la nano-industrie vis-à-vis des processus « verticaux ».

Le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle a étudié de nouvelles voies de traçabilité pour les mesures de longueur aux échelles nanométrique et subnanométrique. Lors de la réunion de 2016 du Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle, il est apparu clairement que le paramètre de maille du silicium avait le potentiel de constituer une nouvelle voie de traçabilité, pour la microscopie électronique à transmission, la microscopie à force atomique et la métrologie des déplacements. Lors de la réunion de 2018 au siège du BIPM, les trois voies de traçabilité pour la métrologie des longueurs à l'aide du paramètre de maille du silicium mentionnées par CODATA ont été présentées. Pour générer et mesurer le déplacement, l'interférométrie à rayons x est utilisée. Des échantillons de silicium comprenant des anneaux empilés de régions planes à l'échelle atomique, séparés verticalement par une distance correspondant à l'espacement du réseau d 111 du silicium (0,314 nm), ont été produits et peuvent être utilisés comme étalons de hauteur de marches pour la microscopie à force atomique ou la microscopie d'interférence optique. Pour la microscopie électronique à transmission, un comptage direct des atomes dans un pilier en silicium est possible. Ces propositions, soumises au CCL, ont été intégrées à la mise en pratique comme réalisations secondaires du mètre.

2. Apporter l'aide du CCL dans de nouveaux domaines

Le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle a été proactif dans ce domaine en travaillant sur le paramètre de maille du silicium qui est un élément essentiel pour l'industrie des semi-conducteurs. Parmi les autres bénéfices que la nanométrologie devrait apporter aux utilisateurs finaux figure l'amélioration de la compatibilité biologique des dispositifs nanométriques (médecine). Une série d'études pilotes a été menée avec succès puis ces études pilotes ont été renommées comparaisons supplémentaires du CCL. Il est prévu que le CCL lance d'autres études pilotes (sur les étalons à semi-conducteurs) et qu'il continue à apporter des conseils et contributions sur la normalisation ISO dans ce domaine :

- Nano 6 : comparaison de largeur de traits (silicium), achevée en 2021, dont le rapport est à paraître fin 2022 (seulement une étude pilote, cette comparaison ne fera pas partie de la KCDB) ;
- Nano 1 : comparaison de photomasques, protocole technique préparé par la PTB et début de comparaison prévu pour fin 2022 (en fonction de la réussite du wafer dont la découpe est en train d'être étudiée) ;
- APMP.L-S5 : comparaison sur les nanoparticules publiée dans la KCDB, pilotée par le CMS/ITRI et le NMIJ et impliquant sept méthodes de mesure et cinq échantillons (1 nano-or, 1 nano-argent et 3 latex de polystyrène) ;
- EURAMET 1239 : mesure de rugosité surfacique par microscopie à force atomique, comparaison achevée, analyse en cours ;
- EURAMET 1242 : mesure de paramètres de rugosité aérienne, comparaison achevée et rapport en cours de rédaction ;
- EURAMET 1490 : comparaison de haute précision de planéité au-delà de 300 mm, résultats en cours de diffusion, projet de rapport A prévu pour 2023 ;
- Comparaison de marches de silicium par microscopie électronique à transmission : premières discussions en vue d'une éventuelle comparaison ;

- Mesures de marches de silicium par microscopie à force atomique : premières discussions en vue d'une éventuelle comparaison.

Le Groupe de discussion 6 sur la métrologie des mesures de coordonnées a analysé la question des CMCs qui reposent sur des mesures prises à l'aide de dispositifs polyvalents populaires, telles que les machines de mesure de coordonnées, ainsi que la question de la préférence de l'industrie pour des mesures optiques sans contact effectuées sur place (en dépit d'un manque de traçabilité et d'une exactitude moindre par rapport aux techniques de contact, ces mesures, du fait de leur rapidité, sont préférées par les utilisateurs). Ce sujet de discussion présente des avantages pour des utilisateurs dans le domaine de la production d'énergie (connecteurs pour les conduites de gaz et de pétrole, engrenages pour les éoliennes, écrans de confinement du plasma dans les réacteurs à fusion) et de la santé (validation de la tomographie à rayons x assistée par ordinateur, prothèses évoluées).

Bien que constituant un domaine de recherche bien établi pour de nombreux laboratoires nationaux de métrologie, la métrologie ou géodésie sur de longues distances représente un sujet relativement nouveau pour certains autres. Toutefois, ce domaine prend de l'importance (dans l'aérospatiale, la géodésie et les opérations de relèvement pour la cartographie, la vérification de la localisation par GPS, l'ingénierie civile, les projets scientifiques de grande envergure tels que le successeur au grand collisionneur de hadrons - LHC, les grands télescopes optiques). Les parties qui bénéficient des avancées dans ce domaine sont d'abord les entreprises fabriquant des produits de grande taille (comme dans l'aérospatiale et le nucléaire civil) où l'automatisation améliorée par la métrologie et la métrologie sur site permettront de diminuer la durée des cycles de fabrication et les coûts des composants onéreux nécessitant un long délai de production.

3. Futurs objectifs du CIPM MRA

Afin de réduire les coûts liés à la mise en place des procédures du CIPM MRA au sein du CCL et d'anticiper les problèmes que pourrait poser le soutien continu au CIPM MRA, le CCL a concentré son travail ces dernières années sur la mise en œuvre efficace du CIPM MRA. Ainsi, le CCL a développé, via son Groupe de travail sur le CIPM MRA, plusieurs stratégies afin de réduire la charge de travail liée au CIPM MRA pour les laboratoires membres du CCL tout en fournissant suffisamment de données pour étayer les CMCs. Depuis sa création, le CCL évalue l'impact du CIPM MRA pour ses membres en termes de temps et de ressources et s'efforce de réduire les inconvénients et les coûts liés à la mise en œuvre du CIPM MRA et au soutien continu du CCL en la matière. Ce travail continu a trois objectifs : réduire la charge de travail liée au pilotage de comparaisons, réduire le portefeuille de comparaisons clés et réduire la charge de travail des laboratoires membres du CCL. Il existe un nombre virtuellement infini de formes et de dimensions présentant un intérêt pratique, ce qui résulte en une immense diversité d'instruments et de normes de mesure des dimensions disponibles sur le marché, tous ne pouvant pas être couverts par le CIPM MRA. Le CCL a optimisé l'utilisation des données de comparaisons pour étayer les CMCS en établissant des classifications de compétences et en donnant aux laboratoires d'accréditation des orientations claires quant au nombre minimum de comparaisons requis, ce qui a permis de réduire le nombre de comparaisons et d'accroître la confiance vis-à-vis des données fournies par les laboratoires pour étayer les CMCs. Le Groupe de travail sur le CIPM MRA a également préparé un large éventail de guides pratiques, protocoles de comparaison, modèles de rapport et tableurs d'évaluation qui peuvent être utilisés par les laboratoires pilotant des comparaisons clés et supplémentaires. Ces documents en accès libre viennent compléter les versions publiquement accessibles de presque tous les protocoles de comparaison du CCL et des organisations régionales de métrologie. Le CCL est ainsi parvenu avec succès à répartir la charge de travail liée aux comparaisons, à réduire le temps de travail du personnel impliqué dans chaque comparaison, à accélérer le processus de comparaison et à obtenir la validation claire des CMCs à partir des résultats de comparaisons.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Principales activités et réalisations

Depuis la précédente réunion de la CGPM, le CCL s'est réuni une fois (selon un cycle d'une réunion tous les trois ans) et ses groupes de travail se sont réunis chacun trois ou quatre fois. En dehors du calendrier de réunions programmées, les groupes de discussion ont continué à être actifs et à rendre compte, lors des réunions du CCL, de leur travail concernant non seulement la planification des comparaisons mais aussi les récentes avancées techniques, les contributions à la mise en œuvre d'étalons, et les idées de projets de recherche collaborative.

Concernant le CIPM MRA, les recommandations formulées par le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA ont été analysées et les actions suivantes ont été réalisées. Le Groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA a préparé un large éventail de guides pratiques et de modèles de rapport qui pourront être utilisés par les laboratoires pilotant des comparaisons, l'objectif étant de réduire la charge de travail et les coûts afin que de nouveaux laboratoires proposent leurs services pour piloter des comparaisons. Au sein de l'EURAMET, plusieurs laboratoires qui ne sont pas membres du CCL ont commencé à utiliser ces modèles et documents et au moins un nouveau laboratoire a proposé de piloter une comparaison clé.

Le sous-groupe de travail sur les CMCs et le DimVIM a révisé la liste de classification des services, le DimVIM, et a pris la responsabilité de sa maintenance. En dehors de la communauté des laboratoires nationaux de métrologie, le DimVIM est utilisé par les organismes de réglementation et d'autres fournisseurs de services car il offre une terminologie harmonisée en 14 langues pour la métrologie dimensionnelle (allemand, anglais, chinois, coréen, espagnol, finnois, français, grec, italien, japonais, portugais, tchèque, thaï et turc).

Les CMCs dans le domaine des longueurs enregistrées dans la KCDB sous la forme d'équations numériques sont en train d'être converties en équations de grandeurs suite à l'approbation du CIPM : cela concerne environ 850 CMCs.

Le CCL a mis à jour la mise en pratique de la définition du mètre afin d'inclure le paramètre de maille du silicium en tant que représentation secondaire du mètre, tel que suggéré par le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle. Les trois méthodes existantes de réalisation du mètre décrites dans le document sont le temps de vol des rayonnements lumineux, l'interférométrie laser (primaires) et le paramètre de maille du silicium (secondaire).

Le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence a préparé et approuvé le guide concernant les CMCs sur les lasers stabilisés en fréquence, ainsi que le protocole technique de la comparaison clé CCL-K11.

Une enquête a été menée au sujet du projet de création d'un mètre numérique du SI, et un Groupe spécifique du CCL sur la transformation numérique a été constitué pour collecter et organiser les données. Une collaboration avec le BIPM est en cours pour parvenir à ce mètre numérique du SI qui permettra aux utilisateurs d'accéder en temps réel aux dernières valeurs des fréquences étalons approuvées par le CIPM et à d'autres paramètres du domaine des longueurs. Un article publié dans *Metrologia* est paru à ce sujet.

Le groupe de travail du CCL sur le CIPM MRA a approuvé un document d'orientation qui consiste en une liste des guides de bonnes pratiques et des sources d'information similaires en métrologie des longueurs, ainsi qu'un document d'orientation sur la révision du système de codage utilisé pour numéroter les comparaisons réalisées dans le cadre du CIPM MRA.

Le CCL a travaillé à l'élaboration d'un numéro spécial de *Metrologia* sur la métrologie dans le domaine des longueurs qui attend d'être finalisé : 16 articles ont été publiés, et le nombre de téléchargements et de citations est très encourageant.

Depuis la 26e réunion de la CGPM (2018), la liste des étalons optiques de fréquence utilisés pour la réalisation du mètre et des représentations secondaires de la seconde a été mise à jour par le Groupe de travail du CCL sur les étalons de fréquence et adoptée par le CIPM après avoir reçu l'approbation du CCTF. La coopération entre le CCL et le Comité technique ISO/TC 213 (Spécifications et vérification dimensionnelles et géométriques des produits) a été formalisée.

Du personnel des laboratoires membres du CCL et des membres des groupes de travail du CCL participent aux conférences Macroscale (www.macroscale.org) et Nanoscale (www.nanoscale.de) ainsi qu'aux comités nationaux et internationaux de normalisation. Leurs contributions portent essentiellement sur les séries de normes ISO GPS (Spécification géométrique des produits). Parmi les comités clés internationaux auxquels le CCL participe figurent les suivants : ISO TC 213 (Spécifications et vérification dimensionnelles et géométriques des produits), ISO TC 60 (Engrenages), ISO TC 1 (Filetages), ISO TC 201 (SC9) (Microscopie par sonde à balayage), ISO TC 202 (Analyse par microfaisceaux), ISO TC 229 (Nanotechnologies), IEC TC 113 (Nanotechnologies) et API SC7 (Ressources concernant les jauges utilisées dans l'industrie du gaz et du pétrole).

En 2021, le NIS (Égypte) est devenu membre ; l'INTI (Argentine), le NIMT (Thaïlande) et le NSC-IM (Ukraine) sont devenus observateurs.

Défis et difficultés

L'un des défis permanents du CCL consiste à étendre le SI à des échelles plus petites ou plus grandes tout en continuant à étayer les aptitudes existantes. Le CCL a déjà fait de l'échelle nanométrique une priorité en créant le Groupe de travail sur la nanométrologie dimensionnelle. Un nouveau type de comparaisons interrégionales, similaire à une « comparaison virtuelle du CCL » mais avec une charge de travail et une planification moins importantes (en particulier pour les membres du CCL), a été développé et présenté au CIPM. Le second cycle de comparaisons clés est en préparation et sera composé à la fois de comparaisons classiques et de comparaisons entre organisations régionales de métrologie. La liaison des résultats de plusieurs comparaisons, en particulier lorsque la taille et les propriétés des artéfacts diffèrent d'une comparaison à l'autre, s'avère difficile et il n'est pas évident de savoir si ce travail de liaison des résultats est nécessaire aux utilisateurs finaux du CIPM MRA lorsqu'ils évaluent des CMCs. Il est aussi à noter que certaines comparaisons en métrologie dimensionnelle fournissent un grand nombre de données, ce qui rend plus difficile la présentation des résultats dans la KCDB, en particulier sous forme de graphiques. Une comparaison de règles divisées (sur un ensemble limité de mesurandes) a généré 960 résultats pour un seul artefact. Le calcul de plus de 921 000 degrés d'équivalence par paires n'est ni pratique ni utile. Il est nécessaire de définir de meilleures métriques pour synthétiser de larges ensembles de données de comparaisons, permettre une comparaison probante des déclarations de CMCs et obtenir une meilleure présentation des résultats dans la KCDB.

Les machines de mesure de coordonnées sont de plus en plus utilisées dans l'industrie, alors même que les voies permettant d'assurer la traçabilité des mesures ainsi effectuées sont mal établies et que les CMCs concernant ces services posent problème. Ces questions font l'objet d'un vif débat au sein du Groupe de discussion sur la métrologie des coordonnées. Les machines de mesure de coordonnées sont utilisées de façon extensive dans l'industrie car elles permettent de mesurer une grande gamme d'objets, la plupart étant utilisés pour des comparaisons clés. Un moyen d'exprimer les CMCs fondées sur l'utilisation de ces machines qui n'entre pas en conflit avec les CMCs actuellement publiées dans la KCDB a été trouvé, ce qui permet une application plus vaste du CIPM MRA. De façon similaire, il faut assurer la traçabilité des logiciels utilisés en métrologie dimensionnelle : certains membres du

CCL réfléchissent à des catégories de CMCs dans ce domaine afin de répondre aux exigences des clients. Toutefois, réussir cette tâche dans le cadre du CIPM MRA est un défi, qui requerra probablement des discussions interdisciplinaires avec d'autres Comités consultatifs.

Perspectives à court terme et à long terme

À court terme, le travail des groupes de discussion se poursuivra lors du prochain cycle de comparaisons clés. Le développement des étalons dans le domaine de la nanométrologie et le lancement d'autres études pilotes, éventuellement sur des sujets interdisciplinaires (le thème des nanoparticules, par exemple, n'est pas uniquement un sujet dimensionnel), seront à l'ordre du jour des futures réunions du Groupe de travail sur la nanométrologie. La mise en place, au sein de certains laboratoires membres du CCL, d'activités sur la tomographie à rayons x assistée par ordinateur, considérée comme un outil de métrologie dimensionnelle, donnera lieu à de nouvelles études qui pourraient mener à de nouvelles CMCs étayées de façon appropriée. Il pourrait être nécessaire de coordonner l'aide apportée aux laboratoires nationaux de métrologie concernant la façon d'expliquer les nouvelles définitions du SI aux utilisateurs finaux. Des services dans le domaine de la métrologie sur de longues distances vont se développer et certains laboratoires membres du CCL, ainsi que le CCL, devront répondre aux besoins de vérification de ces services. Un autre défi consistera à conserver une certaine dynamique pour les activités liées au CIPM MRA car le CCL passe au troisième cycle de comparaisons clés – par exemple pour les cales étalons (K1) : CCL-K1 1998-9, CCL-K1.2011 (2011), CCL-K1.n01 (2022-) – mais de nouvelles techniques et de nouveaux travaux de recherche requièrent une réaffectation des ressources. Pour plusieurs laboratoires membres, la question de la réintégration de CMCs dans des domaines où il n'y a plus de comparaisons clés du CCL (c'est-à-dire où un sujet de comparaison a été abandonné) devra être étudiée. Il est attendu que les certificats d'étalonnage numériques remplacent les certificats traditionnels au format papier : cette transition nécessitera l'assistance du CCL et se fera conformément aux directives générales qui s'appliqueront à tous les comités consultatifs.

Sur le plus long terme, certains services traditionnels seront probablement remplacés par d'autres émergents et les groupes de discussion se concentreront sur d'autres thématiques ; en outre, un autre défi consistera à mettre en place un nouvel ensemble de comparaisons clés et de nouvelles séries de soumissions de CMCs pour les domaines émergents (tels que les services de tomographie à rayons x assistée par ordinateur). Il sera nécessaire de soutenir davantage les services sur site proposés aux clients (étalonnages en dehors des laboratoires) et de traiter les questions de traçabilité qui y sont associées.

Données sur le CCL

CCL établi en 1997 (CDM, Comité consultatif pour la définition du mètre, de 1952 à 1997)

Président :	I. Castelazo
Secrétaire exécutive :	G. Panfilo
Composition :	25 membres et 6 observateurs
Liste des membres et des observateurs :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccl/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	25-27 octobre 2021
Rapports complets des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccl/publications
Cinq Groupes de travail et d'études :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccl

- Transformation numérique
- Stratégie
- Nanométrologie dimensionnelle
- Étalons de fréquence (Groupe commun au CCL et au CCTF)
- CIPM MRA
  - Sous-groupe de travail sur les comparaisons clés
  - Sous-groupe de travail sur les CMCs et le DimVIM
  - Sous-groupe de travail sur la liaison des comparaisons

Neuf Groupes de discussion : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccl

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s) [2022-2023]
Comparaisons clés du CCL (et comparaisons supplémentaires)	8 clés 4 supplémentaires	3 clés (1 effectuée en continu)	1
Comparaisons du BIPM	2	0	0
Études pilotes du CCL	0	0	1 [2017]
CMCs	1723 CMCs dans 51 catégories de services publiées dans la KCDB		

Le président remercie M. Castelazo et demande s'il y a des questions ou commentaires.

M. Milton rappelle que M. Castelazo a évoqué l'intérêt porté à la réalisation secondaire du mètre à l'aide du paramètre de maille du silicium et à ses nouvelles applications. Il demande si, au cours des discussions du CCL, des propositions ont été formulées au sujet de réalisations secondaires similaires qui se concentreraient sur des applications spécifiques à certains secteurs.

M. Castelazo répond qu'à l'heure actuelle, il n'a pas connaissance d'un effort coordonné pour mettre au point une nouvelle réalisation. Cette réalisation secondaire, la première depuis plusieurs années, était nécessaire puisque la réalisation primaire du mètre présente une exactitude de 633 nanomètres, une valeur bien trop élevée pour des applications au nanomètre près. Le CCL a bénéficié de la grande exactitude de la mesure du paramètre de maille réciproque réalisée dans le cadre du projet Avogadro. En termes d'incertitude, le problème ne résidait pas dans les mesures effectuées aux niveaux supérieures de l'échelle des longueurs mais dans celles réalisées aux niveaux inférieurs et cette innovation apporte une solution.

29. Réglementation et infrastructure de la qualité : relever ces défis qu'un monde sépare

Mme Karttunen, analyste des politiques à la Division de la politique réglementaire, rattachée à la Direction de la gouvernance publique de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), indique que la Division de la politique réglementaire de l'OCDE est au service du Comité de la politique de la réglementation qui fait lui-même partie de la Direction de la gouvernance publique de l'OCDE. La Direction traite de toutes les affaires en rapport avec la qualité des institutions publiques, des organismes publics et des procédures en vigueur pour mettre au point des règles et des règlementations. L'OCDE dispose également d'un Comité des échanges et d'une Direction des échanges qui supervisent les politiques, les normes et les réglementations qui peuvent avoir des répercussions sur les échanges commerciaux.

Le Comité de la politique de la réglementation dispose de trois instruments élémentaires, ou documents normatifs, sur lesquels s'appuie l'intégralité de son travail. Premier d'entre eux, la « Recommandation du Conseil concernant la politique et la gouvernance réglementaires », adopté en 2012. Cette recommandation établit des règles en matière de qualité pour réglementer de manière efficace. Elle conseille aux pays de légiférer à partir d'observations factuelles, par exemple des analyses d'impact, afin de mesurer les coûts et les bénéfices des réglementations adoptées. Elle incite également les

responsables des politiques et les régulateurs à consulter les parties prenantes lors de l'élaboration de politiques et prodigue des conseils sur la manière de procéder. Enfin, c'est l'aspect le plus complexe de la recommandation, elle encourage la coopération internationale afin que les réglementations ne freinent pas la créativité et afin de garantir la cohérence des cadres réglementaires. La « Recommandation du Conseil en faveur d'une gouvernance réglementaire agile permettant de mettre l'innovation à profit » a été adoptée en 2021. Elle exhorte les régulateurs à adapter leurs pratiques dans le cadre d'une évolution rapide des technologies ; en effet, les processus classiques de réglementation ne suivent pas toujours le rythme ni la portée d'innovations technologiques qui, souvent, dépassent les frontières et chevauchent plusieurs secteurs régis par des politiques. La « Recommandation du Conseil sur la coopération réglementaire internationale face aux défis de portée mondiale » a été adoptée en 2022. Elle évoque la façon dont les régulateurs nationaux peuvent travailler avec leurs homologues étrangers afin de garantir une cohérence à l'échelle mondiale en matière de commerce et d'échanges internationaux.

Mme Karttunen présente l'approche en cinq étapes de l'OCDE en matière de politiques réglementaires : planifier, élaborer, appliquer, surveiller et évaluer. La première étape consiste à récolter et à s'appuyer sur les connaissances et le savoir-faire internationaux. Les instruments internationaux déjà existants doivent être pris en considération lors de l'élaboration de réglementations et la raison derrière chaque modification doit être dûment justifiée. Les effets au-delà des frontières doivent être évalués dans une relation de collaboration active avec les parties prenantes à l'international. La cohérence avec les instruments internationaux doit être un principe clé au moment de dresser le bilan d'une politique et d'évaluer ses effets *ex post*. La dernière étape consiste à évaluer *ex ante* les besoins en matière de coopération pour garantir une application efficace des politiques et rationaliser des procédures « reproduisibles ». Mme Karttunen explique que l'évaluation *ex post*, l'un des aspects essentiels de la réglementation, est l'une des pratiques les plus rarement mises en œuvre par la plupart des pays. L'inverse vaut pour le monde de la normalisation, au sein duquel les évaluations *ex post* sont monnaie courante. Cet exemple illustre les différences entre les mondes de la réglementation et de la normalisation.

Le Comité de la politique de la réglementation de l'OCDE s'intéresse de manière croissante à la question des normes publiques et privées et ce pour trois raisons principales. Premièrement, l'examen des réglementations et des normes côte à côte montre que les deux ont, en principe, un effet. Les systèmes légaux comme celui de l'OMC sur les obstacles techniques au commerce conçoivent les normes comme facultatives et les réglementations comme obligatoires donc l'effet des normes s'en retrouve diminué. Or, bien que non-contraignantes, les normes peuvent jouer un rôle important et avoir des effets considérables, y compris sur l'économie. Elles peuvent avoir une portée très large, plus encore que certaines réglementations. Cette dichotomie met en avant un contraste entre les systèmes légaux et la réalité.

La gouvernance des réglementations n'est pas du tout élaborée de la même manière que celle des normes. Les réglementations sont mises au point, en général, par des autorités publiques : des régulateurs, des décideurs politiques ou des parlements. Les normes peuvent être élaborées de plusieurs façons : certains pays ont un seul organisme de normalisation, d'autres en ont plusieurs ; dans certains pays ceux-ci sont publics, dans d'autres, ce sont des organismes privés. De plus, des organismes de normalisation nationaux et internationaux coexistent et mènent des activités importantes en parallèle.

Les réglementations publiques font l'objet de contrôles et de contre-pouvoirs nationaux qui pèsent sur toutes les activités publiques, y compris la réglementation. Elles suivent les bonnes pratiques en matière de réglementation préconisées par le Comité de la politique de la réglementation. Le système de normes est plus décentralisé. Le Comité sur les obstacles techniques au commerce (OTC) de l'OMC, par exemple, préconise un certain nombre de principes portant sur la transparence, le consensus, la qualité et la création de normes, le tout à un niveau relativement élevé, mais leur portée reste encore incertaine.

Mme Karttunen remarque que la question est de déterminer dans quelle mesure ces deux mondes, bien qu'ayant des effets similaires, sont considérés comme ayant les mêmes contrôles et les mêmes règles en matière de qualité. Elle ajoute que la méconnaissance par le monde de la réglementation de l'« infrastructure nationale de la qualité », c'est-à-dire des coulisses de la normalisation, pose problème en soi. L'infrastructure nationale de la qualité constitue le cadre d'institutions, législations, règles, procédures et pratiques utilisé pour vérifier la conformité des normes avec les règles en vigueur, qu'elles soient facultatives ou obligatoires. Elle garantit la sécurité des échanges, les facilite et renforce la confiance dans les transactions. Les commerçants rencontrent des difficultés pour démontrer la viabilité de leurs produits s'ils n'ont pas suivi de procédures d'évaluation de la conformité, qu'il s'agisse d'essais, de certifications ou d'inspections. Le monde de la réglementation n'est pas familier des pratiques liées à l'accréditation, la métrologie, les essais, la certification et la surveillance du marché. Le problème est de taille car les régulateurs élaborent parfois des réglementations techniques contraignantes sans prendre en considération l'intégralité de l'infrastructure de la qualité.

Le Comité de la politique de la réglementation de l'OCDE constate que des normes et une infrastructure de la qualité inadaptées constituent des obstacles au commerce, aux investissements, à la croissance et au progrès technologique. D'autre part, des normes et une infrastructure de la qualité efficaces renforcent la création de marchés, l'intégration commerciale et la valeur ajoutée. L'OCDE a déterminé trois conséquences liées au fait que certains régulateurs ne tiennent pas compte de l'infrastructure de la qualité dans leurs processus : les obstacles au commerce (par exemple, des importations et des exportations plus coûteuses), les obstacles à l'innovation et à l'adoption de nouvelles technologies (par exemple, des difficultés à lancer et démocratiser de nouveaux processus) et les contraintes sur la compétitivité, l'investissement et la croissance (et donc des coûts plus élevés pour les consommateurs sans pour autant améliorer leur sécurité).

Mme Karttunen résume les quatre problèmes principaux qui découlent de l'écart entre les mondes de la réglementation et de la normalisation : le statut quasi-réglementaire des normes et des spécifications techniques ; l'aspect essentiel de l'infrastructure nationale de la qualité dans la réglementation ; les questions de la démocratie, du contrôle et de la transparence des réglementations par rapport aux normes d'origine privée ; le défaut d'harmonisation entre les normes et les réglementations lié, en général, aux procédures parallèles.

Les deux communautés à l'origine des politiques, les responsables des politiques commerciales et les responsables des politiques de la réglementation, parlent deux langues différentes. Le monde du commerce parle souvent de « bonnes pratiques réglementaires ». La terminologie de la politique réglementaire comprend, elle, les expressions « mieux réglementer », « réglementation intelligente », « améliorer la réglementation », etc. D'apparence mineures, ces différences de vocabulaires peuvent avoir des effets considérables. Les activités des membres de l'OCDE montrent bien le peu de communication entre ces deux mondes. Les réglementations techniques doivent être signalées au Comité sur les obstacles techniques au commerce de l'OMC et sont en général déclarées par les autorités en matière de politique commerciale. Ces dernières sont distinctes des autorités qui élaborent les réglementations ou qui supervisent leur création et ne communiquent pas nécessairement avec elles. En résulte un nombre potentiellement considérable de réglementations ayant des répercussions sur le commerce qui passent sous les radars, ainsi qu'une rupture au sein même des règlements contraignants tels ceux de l'OMC.

Mme Karttunen résume le travail entrepris par le Comité de la politique de la réglementation de l'OCDE pour faire progresser les questions de la gouvernance et des politiques réglementaires depuis des perspectives diverses. L'OCDE concentre sa réflexion sur trois domaines. Elle travaille d'abord sur la gouvernance et les politiques réglementaires qui constituent la tâche principale du Comité au travers des bonnes pratiques réglementaires. Le partenariat des organisations internationales de l'OCDE rassemble 50 organisations internationales qui travaillent sur les processus de réglementation

et d'élaborations des normes au niveau international. Ce partenariat se concentre sur les règles en matière de qualité qui, appliquées au niveau international, garantissent : l'utilisation d'observations factuelles et d'analyses d'impact ; la consultation, en toute transparence, des parties prenantes ; la mise en place d'évaluations *ex post* et la coordination entre les acteurs internationaux. Ce dernier point est essentiel pour le monde de l'infrastructure de la qualité, ce domaine de travail regroupant plusieurs organisations, certaines internationales. De plus, l'infrastructure nationale de la qualité repose sur un réseau de plusieurs organisations internationales travaillant dans le même domaine ; ainsi, la coordination entre acteurs en est un aspect central. Enfin, un travail est mené sur l'exécution et l'application des réglementations, ainsi que sur la façon de garantir l'adéquation des mécanismes d'application assortis aux régulations avec les risques et le contenu des réglementations elles-mêmes. Dans le cas classique d'une évaluation de la conformité, cet aspect est indispensable pour minimiser la charge que représente habituellement cette procédure.

L'OCDE s'intéresse aux synergies entre les règles en matière de qualité des réglementations et des normes. Elle documente les différents acteurs et procédures de l'infrastructure de la qualité en parallèle de ce qu'elle connaît déjà de l'univers de la réglementation. L'OCDE détermine les mesures, étapes et procédures clés dont un des éléments pourrait dysfonctionner, la façon dont les deux mondes peuvent apprendre l'un de l'autre et le travail nécessaire pour parvenir à des réglementations optimales. L'OCDE œuvre pour formuler des premières recommandations sur les moyens de surmonter les inefficacités de ces deux mondes distincts.

Le président remercie Mme Karttunen et demande s'il y a des questions.

M. Sené (Royaume-Uni) indique qu'au vu de la présentation, une étude économique menée par l'OCDE sur ce sujet bénéficierait à la métrologie ou plus largement au système international de la qualité. Il demande si l'OCDE prévoit d'entreprendre une telle étude.

Mme Karttunen répond que l'OCDE a mené des recherches importantes sur le sujet et qu'une étude commencera début 2023.

M. Härtig (Allemagne) demande si l'OCDE envisage une politique sur les infrastructures numériques et si elle dispose d'une stratégie dans le domaine. Il explique que les projets à venir en matière de processus numériques comprendront notamment des certificats numériques de conformité, des solutions *cloud* et des traces numériques pour les produits : ils nécessiteront donc une harmonisation dans le monde entier car ces systèmes dépassent les frontières nationales.

Mme Karttunen répond que l'OCDE travaille sur un véritable chantier des réglementations dites d'aujourd'hui, ce qui signifie des réglementations dans le contexte des nouvelles technologies, qui devront tenir compte de l'importance des outils numériques de réglementation.

30. Application des principes FAIR aux domaines de la recherche et des mesures

M. Hodson, directeur exécutif de CODATA, explique que son intervention présentera CODATA, les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable* - données faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables), leur relation avec la notion de science ouverte, ainsi que leurs conséquences sur la science et les mesures.

Le Comité sur les données (CODATA) du Conseil international des sciences (ISC), est un organisme affilié de l'ISC qui a été créé par l'organisation prédécesseur de l'ISC, le Conseil international des unions scientifiques. CODATA soutient la mission de l'ISC, « faire progresser la science en tant que

bien public mondial », avec un mandat centré sur les données. Son rôle a évolué et comprend la promotion des principes FAIR et de la notion de science ouverte dans un contexte de mondialisation de la science. CODATA s'organise en groupes de travail et d'étude. Ses membres sont issus du monde entier, y compris des unions scientifiques internationales, ce qui permet de couvrir de nombreux domaines spécifiques de recherche.

Les activités de CODATA ciblent quatre domaines prioritaires : le projet « Faire fonctionner les données pour les grands défis interdisciplinaires » du programme décennal ; les politiques en matière de données (directement via son Comité international sur la politique en matière de données ou indirectement en apportant son expertise à d'autres initiatives), la science des données, et les compétences des données. M. Hodson précise qu'il a présidé le groupe d'experts de la Commission Européenne qui a préparé le rapport « Turning FAIR into Reality »[20] (Transformer FAIR en réalité) s'intéressant à la mise en œuvre des principes FAIR dans la recherche scientifique européenne et qu'il a co-présidé le groupe d'experts à l'origine de la recommandation de l'UNESCO sur la science ouverte. CODATA a mené une étude en partenariat avec l'OCDE qui fait la synthèse d'une quantité importante de données de recherche sur les conséquences économiques des infrastructures de données, en examinant leurs mécanismes de financement, leur modèle commercial et leur proposition de valeur. De plus, CODATA offre aux chercheurs et gestionnaires des données, c'est-à-dire les personnes responsables des données au sein des institutions, un programme de formations rapides et intensives sur les compétences liées aux données.

M. Hodson explique que le principe selon lequel les données et autres résultats de recherche, tels les programmes et les services utilisés, devraient être FAIR sous-tend les politiques et les pratiques en matière de science. La relation entre principes FAIR et science ouverte porte à confusion. Il est important de souligner que bien que l'on évoque souvent les principes FAIR dans le contexte de la science ouverte et que CODATA ait rappelé dans la recommandation de l'UNESCO que les principes FAIR sont un composant essentiel de la science ouverte, FAIR n'est pas nécessairement synonyme d'ouvert. Les critères pour que la science soit dite ouverte sont la reproductibilité, la transparence et l'utilité publique, ce qui est établi par de nombreuses preuves. Les données de recherche devraient être aussi accessibles que possible, et ce par défaut, avec un accès restreint seulement si nécessaire. Les principes FAIR visent à maximiser l'utilité, l'exploitabilité, la transparence et la qualité des données. Ces principes ne s'appliquent pas nécessairement aux jeux de données, qui n'ont pas à être ouverts, mais s'appliquent autant aux données dont l'accès est restreint qu'aux données ouvertes à tous. De plus, l'application de principes de bonne gestion des données est nécessaire pour extraire une plus grande valeur de celles-ci. Des pratiques adaptées de gestion des données permettent de les utiliser plus efficacement.

Selon M. Hodson, les 10 à 15 dernières années ont vu naître le besoin d'une science ouverte et, depuis 2016, de données ouvertes. La science ouverte s'appuie sur l'idée essentielle selon laquelle « bien pratiquer une science, c'est savoir communiquer des preuves ». En 2012, un rapport de la Royal Society, alors présidée par Geoffrey Boulton, ancien président de CODATA, affirmait que « ne pas communiquer les données qui corroborent des assertions scientifiques n'est ni plus ni moins une faute professionnelle ». Un éditorial paru dans *Molecular Brain* et intitulé « *No raw data, no science: another possible source of the reproducibility crisis* »[21] (Pas de science sans données brutes : une autre origine possible de la crise de la reproductibilité) souligne les inquiétudes suscitées dans certaines communautés scientifiques par l'impossibilité de communiquer immédiatement les données et exprime de manière intéressante la préoccupation d'un rédacteur en chef concernant l'absence de données

[20] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Turning FAIR into reality: final report and action plan from the European Commission expert group on FAIR data, Publications Office, 2018, https://data.europa.eu/doi/10.2777/1524

[21] Miyakawa, T. No raw data, no science: another possible source of the reproducibility crisis. *Mol Brain* **13**, 24 (2020). https://doi.org/10.1186/s13041-020-0552-2

communiquées lors de la soumission d'articles. La science ouverte est également bénéfique à la société et à la science, et sera nécessaire pour relever des défis à l'échelle des sociétés ou de la planète. Les organisations internationales, telles l'OCDE, l'UNESCO ou encore la Commission Européenne, développent des outils politiques pour soutenir la science ouverte. Certains domaines de recherche tels la génomique, l'astronomie et la cristallographie ouvrent la voie en rendant leurs données particulièrement accessibles à l'ensemble de leur communauté et sont souvent cités comme exemples à suivre. Les principes FAIR sont assez proches mais ils mettent toutefois l'accent sur la gestion des données et sur l'utilité accrue offerte par une meilleure exploitabilité des données. Ils sont plus axés sur l'exploitation et l'accessibilité par machine.

Aujourd'hui, la science demande d'exécuter du code sur de grands jeux de données hétérogènes provenant de sources diverses. Ces outils, et encore plus l'analyse approfondie, ne fonctionnent qu'en présence d'annotations et de descriptions suffisantes des données et si les principes FAIR sont appliqués. La Commission Européenne a commandé un rapport à PwC en 2019 qui a estimé le coût d'opportunité du non-respect des principes FAIR pour la recherche européenne à 8,2 milliards d'euros. Les études et les entretiens menés avec des chercheurs ont conduit à estimer que près de 80 % des efforts déployés dans un projet sont consacrés aux procédures de collecte et de nettoyage des données. Un argument en faveur des principes FAIR est qu'il est beaucoup plus efficace de fournir des efforts en matière de collecte et de gestion des données que de laisser aux groupes de recherche en aval la responsabilité de la collecte et du nettoyage des données.

M. Hodson présente les principes FAIR essentiels et les métadonnées qu'ils requièrent. Pour être faciles à trouver, les données doivent comporter des métadonnées en quantité suffisante, et pour pouvoir être retrouvées un identifiant unique et permanent. Pour être accessibles, les données doivent pouvoir être retrouvées par des humains et des machines à l'aide d'un protocole utilisant des authentifications et des autorisations là où elles sont nécessaires. L'interopérabilité est permise par des métadonnées rédigées dans un langage « formel, accessible, partagé, et largement utilisable pour représenter des connaissances ». Des données sont réutilisables dès lors que les métadonnées associées fournissent des informations riches et exactes, une licence d'utilisation claire ainsi que des informations détaillées sur leur provenance. Le rapport « Turning FAIR into Reality » a établi une feuille de route et un cadre pour la mise en œuvre des principes FAIR dans la recherche en Europe. Les principes FAIR véhiculent un certain nombre de messages essentiels. L'accessibilité par machine ne devrait pas seulement signifier qu'un jeu de données est téléchargeable mais surtout qu'il est possible de l'exploiter directement grâce à un programme. L'interopérabilité représente un défi qui consiste à disposer de descriptions de variables et grandeurs de manière à pouvoir y faire référence par du code et les utiliser dans le traitement des données. En termes de réutilisation, les modifications qui peuvent être apportées aux données sont connues.

M. Hodson mentionne le concept d'objets numériques FAIR qui, selon lui, revêt différentes interprétations de ce que cela pourrait ou devrait signifier. La plus probante est celle d'une unité d'information exploitable par machine (qu'il s'agisse d'un jeu de données, d'une donnée, d'une image, ou le résultat d'une recherche) qui doit être communiquée avec toutes les informations nécessaires pour pouvoir être utilisée par un humain ou une machine. Une quantité considérable de métadonnées peut être associée à des données et les principes FAIR impliquent qu'elles sont toutes nécessaires. En plus de la donnée, de son identifiant et de son contenu sémantique, il faut également fournir des métadonnées structurelles (la structure du jeu de données ou de l'élément lu, ainsi que sa provenance). Ces règles et ces langages utilisés pour les métadonnées peuvent être appelés (méta)métadonnées. La chaîne d'informations ainsi obtenue est nécessaire au traitement des données. M. Hodson explique que si tout ceci représente un défi et qu'il y a beaucoup de travail à accomplir, les étapes restantes pour mettre en œuvre les principes FAIR et pour rendre les données scientifiques plus exploitables par des machines sont claires.

M. Hodson indique que CODATA est signataire de la « Déclaration commune d'intention sur la transformation numérique au sein de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité » aux côtés du BIPM, du Conseil international des sciences et de nombreuses autres organisations de normalisation et de métrologie. La déclaration a été élaborée à la suite de la conférence en ligne « The International System of Units (SI) in FAIR digital data » organisée du 22 au 26 février 2021. Du point de vue de CODATA, le point essentiel de la déclaration commune prévoit que le fait de maintenir la confiance dans la précision et dans la compatibilité au niveau mondial des mesures nécessitera d'élaborer et d'adopter une représentation entièrement numérique du SI, qui comprendra des représentations numériques robustes, non ambiguës et exploitable par machine des unités, résultats et incertitudes de mesure. Selon CODATA, cette formulation reflète quels sont les éléments de mise en œuvre des principes FAIR dans d'autres domaines de recherche.

M. Hodson explique qu'en matière de mesures et de recherche, il est nécessaire de créer une représentation numérique et FAIR des unités. Le groupe de travail sur la représentation numérique des unités de mesure (DRUM) de CODATA travaille sur le sujet en collaboration avec le BIPM. Il faut également disposer d'une représentation numérique et FAIR des grandeurs, appelées mesurandes ou propriétés dans certains domaines de recherche et variables en sciences sociales. Ce qui est observé et mesuré doit être défini avec précision et cette définition doit être accessible sur internet à l'aide d'un programme. De cette façon, au cours de l'analyse ou du traitement d'un jeu de données, on sait exactement ce à quoi chaque élément fait référence. Les terminologies et les lexiques FAIR sont des outils essentiels décrits dans l'article « *Ten Simple Rules for Making Vocabulary FAIR* »[22] (Dix règles simples pour rendre un vocabulaire FAIR). M. Hodson mentionne des travaux en sciences sociales qui peuvent être appliqués à d'autres types de jeux de données. Ceux-ci exploitent la notion de « variables en cascade » qui désigne une relation codifiée et explicite entre la définition d'un concept (ou « variable conceptuelle ») et ses représentations sous forme de code. La façon dont les variables sont mises en œuvre dans un jeu de données est également renseignée. Une fois les associations établies de manière explicite, le traitement et l'intégration de différents jeux de données s'en trouvent largement facilités.

Le groupe DRUM est chargé de promouvoir la coopération et la coordination entre de nombreuses initiatives pour la représentation numérique des unités de mesure. Il a publié un manifeste qui souligne l'importance de l'engagement de la communauté du Conseil international des sciences et en particulier des unions scientifiques internationales. Les unions scientifiques internationales sont des parties prenantes importantes et représentent les chercheurs au sein de leurs domaines, aux côtés des sociétés savantes et des associations. Cet engagement est un outil permettant de parvenir à un accord sur les pratiques, en particulier dans les domaines de la recherche. Sur le long terme, les unions scientifiques internationales ont pour mission de développer des nomenclatures et des terminologies qui représentent des contributions majeures. Le travail du groupe DRUM est évoqué dans l'article « *Stop squandering data : make units of measurement machine-readable* »[23] (Non au gaspillage de données, rendre les unités de mesure lisibles par machine). Le groupe DRUM contribue au Groupe de travail du CIPM sur les données qui travaille à la mise en place d'un modèle universel de données métrologiques pour les unités de mesure et qui prépare la publication des valeurs des constantes fondamentales recommandées par CODATA sous la forme de données ouvertes liées, lisibles par machine.

M. Hodson mentionne enfin le projet WorldFAIR, qui dispose de deux ans à compter du 1er janvier 2022 pour faire progresser la mise en œuvre des principes FAIR dans toutes sortes de disciplines et de domaines de recherche interdisciplinaires. Tout un éventail de projets contribue de façon remarquable à la définition, à la conceptualisation et à la mise en œuvre des principes FAIR.

---

[22] Cox S.J.D., Gonzalez-Beltran A.N., Magagna B., Marinescu M.-C., Ten simple rules for making a vocabulary FAIR, *PLOS Computational Biology*, 2021, https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009041

[23] Hanisch R., et al., Stop squandering data: make units of measurement machine-readable, *Nature* **605**, 222-224 (2022) https://doi.org/10.1038/d41586-022-01233-w

CODATA est engagé dans cette mise en œuvre et dans la transformation numérique de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité.

Le président remercie M. Hodson et ouvre la discussion.

M. Milton remercie M. Hodson et souligne que sa présentation met en avant l'ampleur des activités en cours dans ce domaine et la quantité de connaissances qui restent à acquérir. M. Hodson a mentionné que les objets numériques FAIR représentaient une question essentielle. M. Milton demande s'il existe un calendrier à suivre à court et moyen terme sur ce sujet. Il poursuit en posant la question de savoir ce qu'il est possible d'apprendre de plus sur les objets numériques FAIR et si la communauté de la métrologie doit créer ses propres structures de données pour répondre à la nouvelle pensée émergente.

M. Hodson répond que l'idée d'objet numérique FAIR est envisagée depuis plusieurs années sous sa forme conceptuelle basique d'unité d'information exploitable par machine. Ce concept déjà bien établi et examiné dans le rapport « Turning FAIR into Reality » consiste en un objet auquel sont jointes toutes les métadonnées nécessaires à son traitement. Il semble peu réaliste de croire qu'une seule norme ou spécification sera associée à ce concept. Certaines normes sont à l'état de projet et les débats se poursuivent sur la portée que ces normes devraient avoir. Aucune spécification n'a pour l'instant été annoncée par le forum sur les objets numériques FAIR et cela pourrait ne jamais être le cas. Plusieurs groupes de travail ont été constitués et se pencheront sur cette question au cours des douze mois à venir. Leur décision sur une possible spécification devrait être connue d'ici la fin de l'année 2023.

31. Rapport de l'ISO sur les activités de liaison

Mme Cristina Draghici, responsable de l'évaluation de la conformité et des questions de consommation au secrétariat central de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), souligne que tous les délégués de la CGPM comprennent la relation entre normes et mesures. Les histoires entremêlées de l'ISO et du BIPM montrent combien cette relation est vivace. Elle s'étend jusqu'à certains domaines de l'évaluation de la conformité et permet une confiance mutuelle dont la déclaration commune sur la métrologie est une illustration. L'ISO est en effet signataire de la Déclaration commune d'intention sur la transformation numérique au sein de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité. La signature du document a été l'occasion pour l'ISO de rappeler son soutien au développement, à la mise en œuvre et à la promotion du cadre numérique du SI en tant qu'étape d'une transformation plus large de l'infrastructure internationale scientifique et de la qualité.

La transformation numérique n'a pas seulement bouleversé le monde des idées, des journaux et des médias, elle a également changé la nature et le potentiel de la chaîne d'approvisionnement de manière évidente. Les progrès de l'impression 3D permettent de produire des objets complexes depuis chez soi, là où une usine aurait été nécessaire dix ans plus tôt. Ces objets peuvent être acheminés physiquement à l'aide d'options de livraison de plus en plus diverses et reposant sur les technologies numériques, y compris des drones, ou des coursiers à vélo géolocalisés par l'intelligence artificielle et engagés et rémunérés numériquement. La transformation numérique est riche d'opportunités pour une mondialisation d'un nouveau genre, dans laquelle les entrepreneurs et les investisseurs évoluent sur les marchés internationaux en rencontrant moins d'obstacles qu'auparavant. Cette technologie, qui permettrait de créer des emplois dans des territoires reculés et de stimuler les économies, est essentielle pour des « livraisons sans délai » et pour la maintenance de la chaîne d'approvisionnement dans des contextes volatils et en rapide évolution. Ces progrès sont un moyen potentiel d'intégrer plus de personnes que jamais aux échanges internationaux. Il reste toutefois des questions pratiques à résoudre.

L'Organisation mondiale du commerce (OMC) encourage fortement ses membres à utiliser une norme internationale pour leurs mesures afin de faciliter les échanges et de rendre l'environnement commercial plus prévisible. Il faut toutefois tenir compte des conséquences de la transformation numérique progressive de l'environnement commercial du point de vue des obstacles techniques au commerce. Il est également nécessaire de prendre en considération le rôle des normes et de la métrologie dans ce monde numérique. Se mêlent un climat de défiance, des chaînes d'approvisionnement complexes en réseau, et un environnement composé d'objets physiques mais également d'objets intégralement numériques. C'est notamment le cas des « jumeaux numériques », qui permettent d'accélérer des essais et des simulations trop complexes et coûteuses à effectuer dans la réalité.

Mme Draghici présente les répercussions sur le travail de l'ISO et poursuit en montrant en quoi la collaboration actuelle entre l'ISO et le BIPM sera essentielle pour renforcer la confiance dans le monde numérique. L'ISO a identifié trois principales mutations du secteur de l'évaluation de la conformité du fait de la transformation numérique, reposant toutes sur la métrologie numérique. Tout d'abord, le recours à des méthodes d'évaluation à distance est de plus en plus fréquent, en particulier depuis la pandémie de Covid-19. Si les avantages en matière d'efficience et d'exactitude sont établis, une intervention humaine reste requise dans de nombreuses situations. Seconde évolution, l'évaluation d'objets eux-mêmes entièrement numériques. De nombreuses questions se posent sur les caractéristiques et les spécificités d'un objet strictement numérique et sur la façon dont il répond aux exigences et aux protocoles nécessaires pour le faire fonctionner et interagir de la façon voulue. Enfin, se pose la question de la transformation numérique des certificats, à quoi ceux-ci ressembleront et comment ils fonctionneront. L'ISO a conscience de la volonté de faire progresser ce domaine, la majorité des membres qu'elle a consulté à ce sujet ayant répondu être favorables au développement d'un modèle hybride. Celui-ci concernerait à la fois l'audit à distance, le recours à des jumeaux numériques, les effets de la lisibilité par ordinateur, le cadre numérique du SI et des normes qui peuvent être exécutées et transférées.

Le projet ISO SMART, qui se poursuivra pendant plusieurs années, pourrait transformer la manière dont l'ISO développe ses normes et la façon dont elles sont utilisées. Le projet vise à développer des normes lisibles et exploitables par les machines, tout en conservant la méthode habituelle d'élaboration de ces normes. Ce projet affiche un fort potentiel et nécessitera une collaboration entre l'ISO et le BIPM, car les mesures et unités doivent être pleinement prises en considération et le projet requiert de « réussir du premier coup ». Les normes SMART vont rendre la vie plus simple, plus sûre et plus agréable : plus simple en améliorant l'efficience par une réduction des interventions humaines ; plus sûre en réduisant le risque d'erreurs d'origine humaine ; plus agréable en améliorant la pertinence, l'applicabilité et l'utilisation systématique des normes. Le projet ISO SMART est entré dans sa deuxième phase, au cours de laquelle une consultation extensive menée auprès de ses membres permet à l'ISO d'adapter son approche pour mieux répondre aux exigences. Début 2023, l'ISO débutera la phase de mise en œuvre. Le processus de consultations répétées se poursuivra pendant la durée de la mise en œuvre, au cours de laquelle l'ISO continuera à affiner et à adapter son approche. La technologie bouleverse presque tous les domaines de la normalisation, d'où la nécessité de travailler en collaboration avec le BIPM au sein du cadre numérique du SI.

Mme Draghici indique que si les certificats numériques peuvent être simples, il reste à s'assurer de leur traçabilité et de la confiance accordée aux normes de conformité numériques, par exemple en évitant la fraude ou la corruption susceptibles d'ébranler la confiance dans le système. Il revient aux acteurs déjà établis, comme l'ISO ou le BIPM, d'apporter toute la stabilité nécessaire au processus. Il faut définir des façons de résoudre ces difficultés afin de bénéficier du plein potentiel de tels certificats, y compris leur lisibilité par des machines, et ainsi les intégrer à une chaîne de production intelligente.

Mme Draghici présente les futurs plans de travail pour les secteurs concernés. En 2023, l'ISO organisera une série de tables rondes sur le thème de l'évaluation numérique de la conformité. Ces sessions virtuelles

réuniront des experts pour évoquer trois sujets différents : les objets numériques d'évaluation de la conformité, la méthodologie numérique concernant les mesures, et les déclarations numériques de conformité. Le Comité ISO pour l'évaluation de la conformité (CASCO) développe actuellement la norme ISO/IEC 17012 sur la conduite d'audits à distance pour répondre aux besoins de la communauté de la métrologie. L'ISO tient compte de la question de la soutenabilité, à laquelle elle répond sur deux plans : celui du climat d'abord, avec la Déclaration de Londres qui traduit son engagement en faveur du climat ; deuxièmement, celui de la diversité et de l'inclusivité. L'ISO met en place un comité de coordination sur les critères environnementaux, sociaux et de gouvernance. Ce comité coordonnera l'action de l'ISO et travaillera main dans la main avec ses organisations partenaires et les autres organisations internationales. Le Comité ISO pour l'évaluation de la conformité a formé un groupe de travail pour étudier les possibles adaptations des besoins en matière d'évaluation de la conformité et ce qui peut être fait pour remplir les critères environnementaux, sociaux et de gouvernance.

Mme Draghici explique qu'à mesure que la transformation numérique du monde avance, deux défis se posent : celui d'aller vite, et celui de bien faire. Le processus de l'ISO implique un large ensemble de parties prenantes, des progrès sont réalisés afin, notamment, d'offrir des normes collaboratives développées à l'aide d'un outil en ligne. Il est pourtant possible de gérer ce processus d'une nouvelle façon, plus efficiente. L'objectif est de s'assurer que l'ISO et le BIPM continuent à collaborer étroitement. La longue histoire de la collaboration entre les deux organisations met en évidence des synergies et des chevauchements entre les deux mondes. Dans un avenir numérique, la collaboration entre le BIPM et l'ISO ne sera que plus importante.

Le président remercie Mme Draghici et demande s'il y a des questions.

M. Härtig (Allemagne) demande des détails sur le format des évaluations numériques de conformité. D'après l'ISO/IEC 17065, ce format est presque entièrement défini mais son lancement pose des difficultés ; en effet, lorsque la norme ISO a été développée, la transformation numérique n'y était mentionnée nulle part. M. Härtig demande si l'ISO a établi une stratégie pour améliorer l'aspect numérique du processus et trouver une solution qui vienne s'ajouter aux normes existantes.

Mme Draghici répond que l'ISO est consciente que les séries de normes élaborées par le Comité ISO pour l'évaluation de la conformité, comme les séries de normes ISO/IEC, qui sont à la base du système d'évaluation de la conformité, doivent s'adapter à la nouvelle réalité du monde numérique. Une équipe a été réunie quelques années plus tôt afin de déterminer si la boîte à outils (la série de normes) est toujours utilisable, si d'éventuelles lacunes persistent et s'il est nécessaire d'apporter des changements pour s'adapter aux normes SMART et aux procédures numériques d'évaluation de la conformité, aux produits numériques des évaluations de la conformité et aux certificats numériques. La norme ISO/IEC 17065 doit faire l'objet d'un examen systématique en 2023, qui sera l'occasion de passer en revue les nouvelles exigences. L'évolution vers un audit en ligne des normes s'accompagnera d'une systématisation des méthodes de travail à distance et asynchrones dans le processus d'élaboration des normes. Ceci devrait aller de pair avec une accélération de la révision, de l'adaptation et de l'entrée en vigueur de nouvelles normes pour répondre aux besoins.

32. Rapport du président du CCU

M. Joachim Ullrich, président du Comité consultatif des unités (CCU), présente son rapport sur les activités du CCU depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCU

Le CCU a pour responsabilité de faire évoluer et d'améliorer le Système international d'unités, le SI, et conseille le CIPM sur les unités de mesure en général. Afin de remplir sa mission, le CCU consulte les laboratoires nationaux de métrologie membres du comité, ses organismes de liaison et les autres Comités consultatifs. Jusqu'en 2018, le CCU s'est consacré à la révision du SI, approuvée par la CGPM la même année puis mise en œuvre en 2019. Depuis, la stratégie du CCU a été révisée et le CCU se concentre désormais sur un certain nombre de sujets liés aux futures améliorations du SI dont, à court terme, l'ajout de nouveaux préfixes pour les unités du SI et la clarification du rôle des unités d'angle et des grandeurs dites sans dimension dans le SI. À long terme, la redéfinition prévue de la seconde constituera l'objet principal du travail du CCU. Le CCU suit de près l'évolution de la transformation numérique de la métrologie et cherche à définir le rôle qu'il pourrait jouer en la matière. L'élaboration de définitions non ambiguës des termes métrologiques fondamentaux sera sans doute d'une importance cruciale pour soutenir l'amélioration de la lisibilité et de l'interopérabilité par machine des données métrologiques.

Domaine de compétence du CCU

Le travail du CCU porte sur les thèmes suivants :

- faire évoluer et améliorer le Système international d'unités, le SI ;
- conseiller le CIPM sur les unités de mesure en général ;
- fournir des informations et conseils sur les unités et leur utilisation, au-delà du CIPM, à un large éventail d'organismes, associations, commissions et comités internationaux, ainsi qu'à des personnes contactant le BIPM à cette fin.

Afin de remplir sa mission, le CCU prend conseil auprès de ses membres et parties prenantes, d'associations, de commissions et comités internationaux, ainsi que d'organisations intergouvernementales et organismes internationaux, avec lesquels il entretient des liens. Il travaille par ailleurs en étroite collaboration avec les autres Comités consultatifs et les laboratoires nationaux de métrologie. Le CCU a pour responsabilité de préparer les éditions successives de la Brochure sur le SI, y compris de son Résumé. La Brochure sur le SI est la publication du BIPM la plus importante et la plus largement utilisée. Elle en est aujourd'hui à sa 9e édition, qui inclut les définitions révisées des unités de base du SI. Le CCU apporte le plus grand soin à la préparation du texte, en prenant en considération non seulement la précision du sens du texte mais aussi le fait que la Brochure sur le SI est traduite dans de nombreuses autres langues et qu'elle est utilisée par des personnes dont la langue maternelle n'est ni le français ni l'anglais. Dernièrement, le CCU a pris les mesures nécessaires pour soutenir les avancées de la transformation numérique en métrologie, notamment en fournissant des définitions adaptées de termes métrologiques fondamentaux afin d'améliorer la lisibilité et l'interopérabilité par machine.

Stratégie

Jusqu'en 2018, la stratégie du CCU s'est concentrée sur le travail de préparation de la révision du SI, approuvée par la CGPM en 2018 puis mise en œuvre le 20 mai 2019. La principale responsabilité du CCU demeure de faire évoluer et d'améliorer le SI. Le document de stratégie du CCU, mis à jour en mars 2022, identifie un certain nombre d'activités à mener dans le domaine : préparer la redéfinition de la seconde (en collaboration avec le CCTF), clarifier le statut des unités d'angle et des grandeurs sans dimension dans le SI, étendre la liste des préfixes du SI en fonction des besoins, clarifier les définitions des termes métrologiques fondamentaux, et étudier la nécessité ou non de maintenir une distinction entre les unités de base et les unités dérivées. Le CCU, en particulier son Groupe de travail sur la stratégie, suit de près le processus croissant de transformation numérique de la métrologie et

explore le rôle que pourrait jouer le CCU. Pour traiter ces sujets, qui ne peuvent pas faire l'objet du travail du comité entier, le CCU crée des groupes de travail ou des groupes spécifiques, qui sont ensuite dissous une fois leur tâche accomplie. Le CCU compte actuellement deux Groupes de travail, celui sur la stratégie et celui sur la définition des termes métrologiques fondamentaux, et un Groupe spécifique sur le traitement des unités d'angle et des grandeurs sans dimension dans la Brochure sur le SI. Le Groupe de travail sur la stratégie se réunit une fois par an et prépare les sessions plénières du CCU, qui se réunit une fois tous les deux ans.

En raison de sa nature transversale, le CCU interagit avec de nombreux organismes directement intéressés par ses activités. Des délégués des autres Comités consultatifs sont invités à assister aux réunions du CCU. Les unions et organisations internationales scientifiques concernées sont également invitées à ces réunions en tant qu'organismes de liaison. Même s'ils ne sont pas membres du CCU, les organismes de liaison ont en pratique les mêmes droits que les membres lorsqu'il s'agit de partager leur opinion sur les questions débattues.

Activités et réalisations depuis la dernière réunion de la CGPM

Principales activités et réalisations

Après la mise en œuvre de la révision du SI, le CCU a mené une enquête auprès de ses membres, de ses organismes de liaison et du monde de l'enseignement afin de recueillir leurs commentaires sur la façon dont la révision a été présentée, sur la stratégie de communication, sur la mise en œuvre de la révision, ainsi que sur les innovations que permet le SI révisé. Un questionnaire spécifique a été élaboré pour chacune des trois communautés. Ces questionnaires ont été envoyés aux directeurs des laboratoires nationaux de métrologie de tous les États Membres et aux présidents des organismes de liaison du CCU. Il a été demandé aux directeurs des laboratoires nationaux de transmettre aux institutions concernées de leur pays le questionnaire destiné aux organisations du monde de l'enseignement. Au total, 18 laboratoires nationaux de métrologie, 7 organismes de liaison, 12 universités et 5 écoles ont soumis des réponses : aucun des laboratoires nationaux de métrologie n'a rencontré de véritable difficulté dans la mise en œuvre du SI révisé et la révision n'a pas eu d'impact significatif sur leurs clients. Diverses approches innovantes ont été mentionnées. Tous les laboratoires de métrologie ont profité de cet évènement pour promouvoir l'importance de la métrologie. Les organismes de liaison ont en général été bien informés des changements et n'ont pas rencontré de difficultés majeures. Certaines universités avaient déjà intégré la révision du SI à leurs programmes, là où d'autres n'avaient pas entendu parler des changements apportés au SI.

Au cours de ses 24e et 25e réunions, le CCU a discuté de la nécessité d'étendre la liste actuelle de préfixes du SI, de 10^{24} à 10^{30} et de 10^{-24} à 10^{-30}. La science des données et la croissance exponentielle de la datasphère mondiale ont été les moteurs de cette évolution. Des noms non-officiels pour les nouveaux préfixes avaient déjà émergé au sein de cette communauté et circulaient dans des médias scientifiques populaires. Une feuille de route a été élaborée dans le but de présenter un projet de résolution à la 27e réunion de la CGPM en 2022. Le Projet de résolution C propose ainsi quatre nouveaux préfixes permettant de couvrir ces nouveaux ordres de grandeur.

Le CCU a de nouveau examiné la question de longue date liée au statut du radian et du stéradian, ainsi qu'à celui des grandeurs dites sans dimension, au sein du SI. Au cours de la 24e réunion du CCU, il a été demandé à tous les membres et organismes de liaison du CCU de réfléchir au statut des unités d'angle et des grandeurs sans dimension afin de pouvoir présenter la position de leur institution lors de la réunion suivante. Une majorité s'est ainsi prononcée en faveur d'un statu quo concernant le fait de définir les unités d'angle comme des unités dérivées ; toutefois, certains étaient favorables au fait d'améliorer la Brochure sur le SI afin d'éviter, dans la mesure du possible, toute incompréhension et erreur. Le Groupe spécifique du CCU sur les angles et les grandeurs sans dimension dans la Brochure

sur le SI a été créé avec pour objectif de proposer des clarifications à apporter au texte de la Brochure sur le SI concernant ces sujets. Le groupe a débuté son travail et doit présenter ses premières recommandations lors de la prochaine réunion du CCU. Il a été décidé d'organiser début 2023 un atelier commun CCU/CCQM sur les grandeurs dont la valeur peut être déterminée par comptage, auquel d'autres Comités consultatifs participeront. L'atelier vise à ouvrir la discussion sur le comptage au sein de la communauté de la métrologie afin de parvenir à une compréhension commune de la notion de comptage dans le cadre du SI.

En raison de la révision du SI, qui a permis de faire reposer l'ensemble du système d'unités sur sept constantes fondamentales, s'est posée la question de la définition de termes comme « unité », « grandeur » et « valeur d'une grandeur ». Le CCU a mis en place un nouveau Groupe spécifique sur les termes métrologiques fondamentaux afin d'identifier les principaux termes qui sont employés dans les résolutions de la CGPM et dans les législations nationales, et donc qui intéressent les États Membres, puis de proposer des définitions pour ces termes, tout en tenant compte des futurs besoins de la transformation numérique. Plusieurs réunions n'ont pas permis d'aboutir à un consensus et le savoir-faire en matière de transformation numérique a fait défaut. Il a par conséquent été décidé de mieux prendre en considération les besoins en matière de lisibilité par machine de ces termes. Des experts supplémentaires disposant de l'expérience requise dans les domaines de la transformation numérique, des mathématiques et de la linguistique ont été invités à participer aux prochaines réunions du groupe spécifique.

Le document de stratégie du CCU, en vigueur depuis février 2014, a été révisé par le Groupe de travail sur la stratégie afin de préciser la mission du CCU une fois la révision du SI approuvée et mise en œuvre. L'une des principales tâches du CCU sera, à l'avenir, de superviser les avancées permettant de redéfinir la seconde. Ces travaux seront conduits par le CCTF et les étapes nécessaires ont été définies dans une feuille de route du CCTF, qui prévoit actuellement une possible adoption de la redéfinition de la seconde par la CGPM en 2030.

Défis et difficultés

Un défi majeur du CCU sera d'établir des définitions mathématiquement et métrologiquement valides des termes métrologiques fondamentaux, de sorte que les machines puissent être capables de les « comprendre » sans ambiguïté, de les interpréter et, enfin, d'agir en fonction de celles-ci. Ce travail revêt une importance cruciale pour l'avenir de l'infrastructure internationale de la qualité, qui repose sur ces définitions. Il devrait par ailleurs constituer le fondement d'un « VIM numérique » (Vocabulaire international de métrologie), qui aura lui-même des conséquences pratiques non négligeables sur la normalisation, par exemple sur la série de normes ISO 80000, puis sur de nombreux futurs services métrologiques tels que les certificats d'étalonnage numériques.

Le défi de parvenir à un consensus concernant la place du radian et du stéradian dans le SI reste à relever. Ce débat de longue date voit s'affronter deux conceptions opposées : il s'agit de savoir si les unités d'angle doivent rester des unités dérivées ou si le radian peut prétendre au statut de huitième unité de base. Si la seconde possibilité était privilégiée, de nombreuses équations usuelles devraient être modifiées. Une alternative consisterait à réintroduire la catégorie des unités supplémentaires, à laquelle les unités d'angle appartenaient jusqu'en 1995, date d'abrogation de cette catégorie suite à une décision adoptée par la CGPM à sa 20e réunion. La participation de l'Union mathématique internationale au CCU comme organisme de liaison permet d'approfondir les aspects scientifiques du débat.

Perspective à court terme et à long terme

Une fois que les nouveaux préfixes du SI auront été approuvés par la CGPM à sa 27e réunion (2022), une nouvelle version de la 9e édition de la Brochure sur le SI sera publiée et comprendra diverses

améliorations éditoriales. À court terme, le travail du CCU consistera pour l'essentiel à établir clairement le statut des unités d'angle et des grandeurs sans dimension et à soutenir la transformation numérique de la métrologie en fournissant des définitions lisibles et exploitables par machine des termes métrologiques fondamentaux.

À plus long terme, le CCU se concentrera sur la redéfinition de la seconde, que le CCTF est en train de préparer. Une feuille de route a été élaborée par le CCTF afin d'en préciser le calendrier et de fixer les étapes clés. Le scénario le plus probable conduirait à une redéfinition en 2030. Le CCU contribuera à ce processus et examinera l'impact des propositions concernant la redéfinition de la seconde sur les autres domaines de la métrologie.

Données sur le CCU

CCU établi en 1964

Président :	J. Ullrich
Secrétaire exécutif :	M. Stock
Composition (depuis 2018) :	13 membres, 11 organismes de liaison, aucun observateur
Liste des membres :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccu/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	8-9 octobre 2019, 21-23 septembre 2021
Rapports complets des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccu/publications
Deux Groupes de travail :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccu

- Termes métrologiques fondamentaux
- Stratégie

Un groupe spécifique :

- Angles et grandeurs sans dimension dans la Brochure sur le SI

33. Présentation du projet de résolution C « Sur l'extension de la liste des préfixes du SI »

M. Richard Brown, directeur de la métrologie au NPL (National Physical Laboratory, Royaume-Uni), rappelle le rôle essentiel joué par le Système international d'unités (SI) dans le monde moderne. Lorsque l'on évoque le SI, les gens pensent en général aux unités de base et aux unités dérivées du SI, observe-t-il. Depuis la révision du SI en 2019, il arrive que les gens connaissent également les constantes qui le définissent mais ils pensent rarement aux préfixes du SI. Or les préfixes jouent un rôle indispensable au sein du SI et constituent probablement ce que le grand public connaît le mieux du SI. En effet, les préfixes sont présents dans la vie quotidienne de chacun, lorsque qu'on effectue des pesées ou des mesures, que ce soient des kilogrammes, des millilitres ou des kilowatts heure. Ces préfixes sont entrés dans la langue générale pour former des termes techniques tels que nanotechnologie, microfilm ou encore mégadonnées.

Les multiples et les sous-multiples formés à l'aide des préfixes du SI font partie de l'ensemble complet des unités du SI. Les préfixes permettent d'utiliser les unités du SI pour désigner des quantités de tailles très différentes, ce qui les rend particulièrement importants. Ils sont indispensables pour partager de manière efficace des résultats de mesure entre disciplines. L'utilisation des préfixes du SI permet par exemple de se déplacer sans difficulté le long de l'échelle des distances, de passer du nanomètre au micromètre, au millimètre, au mètre et à tous ses multiples. De plus, les préfixes du SI garantissent que la valeur numérique de la grandeur que l'on cherche à exprimer est intelligible pour les humains et de préférence comprise entre 1 et 100.

M. Brown souligne que les résultats de mesure n'en sont que plus simples à comprendre et à communiquer. Il prend l'exemple de la fraction molaire de l'hexafluorure de soufre dans l'atmosphère. Elle peut être exprimée de trois façons différentes : avec la notation décimale, la notation scientifique ou à l'aide d'un préfixe du SI. En raison du nombre de zéros situés après la virgule décimale, la notation décimale est la plus difficile à appréhender (0,000 000 000 011 mol/mol). L'écriture scientifique présente moins de difficultés ($1{,}1 \times 10^{-11}$ mol/mol) mais la notation utilisant un préfixe du SI (11 pmol/mol) est de loin la plus simple à comprendre. Tout comme le SI, les préfixes ont évolué pour répondre aux besoins des différents acteurs, et ce pour trois raisons principales : d'abord, afin de systématiser l'utilisation du SI dans certaines communautés scientifiques, dont les besoins vont au-delà de la liste actuelle ; deuxièmement, pour répondre aux progrès de la science et de la technologie, qui nécessitent une liste plus étendue de préfixes multiplicateurs ; troisièmement, afin de s'assurer qu'aucun des noms officieux en usage ou en circulation ne soit adopté *de facto*. Le SI doit apporter une réponse à chacune de ces trois situations, sous peine de voir des solutions en dehors du SI apparaître. C'est ce qu'il a toujours fait.

Les préfixes du SI ont évolué avec le temps. Le premier ensemble de préfixes a été adopté rapidement après la signature de la Convention du Mètre en 1875. En 1935, la liste des préfixes a connu une extension afin de répondre aux besoins croissants de l'électricité et du génie électrique. La formalisation du SI en 1960 a été l'occasion de prendre en considération les besoins de la communauté de la normalisation et d'ajouter de nouveaux préfixes. Depuis, le SI s'est adapté aux besoins de la physique nucléaire, de la précision du temps, des fréquences électromagnétiques, de la consommation mondiale d'énergie et de la radioactivité. L'année 1991 a vu l'ajout de nouveaux préfixes du SI pour permettre à la communauté de la chimie d'exprimer des quantités de molécules : c'était il y a trente-et-un ans. Jamais, depuis la Convention du Mètre, il ne s'était écoulé autant de temps entre deux extensions de la liste de préfixes du SI. La proposition soumise à la CGPM vise à répondre aux besoins de la sciences des données, de la transformation numérique et de la mégascience en général.

M. Brown rappelle que le SI doit tenir compte de l'augmentation rapide de la taille des jeux de données utilisés dans la recherche scientifique et qu'il doit permettre également de décrire le niveau de détail nécessaire à l'étude de l'univers. Le SI s'intéresse particulièrement à la science des données, qui semble largement préférer les préfixes décimaux du SI aux préfixes binaires normalisés par la norme IEC 80000-13. Une étude[24] menée sur la fréquence des préfixes décimaux du SI dans la littérature scientifique parue de 1992 à 2017 a établi qu'ils y étaient en moyenne cent fois plus usités que les préfixes binaires. Or, si les préfixes du SI sont privilégiés dans le domaine de la science des données, ils le sont aussi dans la vie quotidienne.

Concernant les préfixes du SI, les besoins de la science des données et du stockage de données numériques produites par nos ordinateurs, nos téléphones, etc. suivent l'augmentation annuelle de la taille de la datasphère mondiale. Cette dernière connaît une croissance exponentielle et l'on s'attend à une accélération du phénomène en raison, par exemple, de l'étendue de la transformation numérique, ou de l'avènement de l'informatique quantique, de l'internet des objets ou bien des communications 6G. D'ici à 2025, la datasphère mondiale devrait peser près de 175 zettaoctets et poursuivre son expansion. Elle atteindra rapidement les yottaoctets, qui culminent actuellement dans la gamme des préfixes à 10^{24}. La question se pose de savoir ce qui peut être plus grand qu'un yottaoctet. De nombreuses désignations non officielles circulent déjà pour 10^{27} et risquent d'être adoptées. C'est pourquoi le SI doit proposer des préfixes officiels. Par symétrie, une extension aux sous-multiples serait très utile et les domaines de pointe que sont la physique des particules et l'astronomie pourraient en tirer parti.

[24] Brown R.J.C., On the nature of SI prefixes and the requirements for extending the available range, 2019, *Measurement*, **137**, 339-343, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.059

Le projet de résolution C propose que les nouveaux préfixes fonctionnent de la même façon que les précédents : les deux symboles sélectionnés deviendront la première lettre de leur nom. Parmi l'alphabet latin, seules les lettres R et Q sont toujours disponibles, les autres désignant déjà des unités ou des préfixes du SI. Les symboles des multiples s'écrivent toujours en majuscules et ceux des sous-multiples en minuscules. Les noms des multiples se terminent toujours par un -A et ceux des sous-multiples par un -O. Comme pour les préfixes précédents, les racines des noms des nouveaux préfixes proposés sont inspirées du grec pour « neuf » et du latin et du grec pour « dix ».

On obtient ainsi les désignations suivantes : 10^{27}, ronna, R majuscule ; 10^{-27}, ronto, r minuscule ; 10^{30}, quetta, Q majuscule ; 10^{-30}, quecto, q minuscule. En cas d'adoption du projet de résolution, le SI comprendrait un ensemble de 24 préfixes qui permettrait de couvrir soixante ordres de grandeur. M. Brown souligne qu'il s'agirait d'un ajout utile, opportun et peu risqué pour le SI, les préfixes permettant de promouvoir une communication scientifique unifiée et efficace.

Le président remercie M. Brown et demande s'il y a des questions ou des commentaires.

M. Milton observe que la communauté de la métrologie s'inquiète de l'impact de ses actions. Cet impact peut se mesurer en fonction de l'intérêt qu'accorde la presse à certaines activités. Les deux points à l'ordre du jour qui ont le plus intéressé les médias sont les préfixes du SI et la résolution sur l'échelle de temps continue. Si l'on en croit l'intérêt porté par la presse au sujet, l'adoption de cette résolution pourrait constituer l'une des décisions les plus importantes de la CGPM. M. Milton remercie M. Brown pour sa présentation et note que le besoin de disposer de nouveaux préfixes est commun à de nombreuses communautés scientifiques. La question est posée de savoir si la lisibilité par ordinateur des caractères minuscules et majuscules des symboles a été pris en considération car confondre ces éléments pourrait conduire à des résultats très différents. M. Brown répond qu'il ne s'attend pas à ce que cela représente une difficulté contrairement, par exemple, à la représentation numérique du symbole de micro.

34. Introduction au projet de résolution B « Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités »

M. Ullrich, en sa qualité de président du Groupe de travail du CIPM sur le SI numérique, commence son intervention par des prévisions sur l'avenir de l'infrastructure de la qualité. D'ici à 2050, la part de la population mondiale habitant en ville devrait passer de 50 à 80 %. Du fait de cette croissance, il sera nécessaire de repenser le fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement, de réfléchir aux mesures, à la métrologie et à l'infrastructure de la qualité requises, et de s'interroger sur la façon de garantir un haut niveau de qualité et de fiabilité concernant les systèmes complexes et interconnectés tels que la santé, l'habitat, la mobilité et les usines connectées. Ces systèmes seront probablement connectés entre eux par des réseaux 5G ou 6G et intègreront à la fois le réseau électrique, des batteries, le chauffage, l'approvisionnement en eau, le refroidissement, etc. Selon M. Ullrich, ce système interconnecté sera certainement sous le contrôle de l'intelligence artificielle.

Ces systèmes interconnectés fonctionneront grâce à des données mesurées par des millions de capteurs, or, les données de mesures sont généralement exprimées à l'aide d'unités du SI. Le SI est placé sous l'autorité de la Convention du Mètre et le BIPM représente 98 % du PIB mondial. Le BIPM offre les bases scientifiques nécessaire à l'infrastructure de la qualité, ce que M. Ulrich illustre en rappelant que près de 65 000 laboratoires dans le monde se conforment à la norme ISO/IEC 17025 qui exige la traçabilité au SI. Il souligne que l'infrastructure de la qualité au niveau mondial repose sur la métrologie, la normalisation et l'accréditation et que les activités en matière d'infrastructure de la qualité sont menées aux niveaux national et international par les laboratoires nationaux de métrologie,

les organismes nationaux de normalisation et les organismes nationaux d'accréditation, puis au niveau national par les organismes de certification et d'inspection et les laboratoires d'essais et d'étalonnage. Ces systèmes complexes et interconnectés, qui ne concernent pas seulement l'infrastructure de la qualité, mais également l'industrie, la santé et la science, nécessiteront la création de processus numériques impliquant un accord mondial au sujet du format des métadonnées pour toutes les données de mesures exprimées à l'aide du SI. Ce sujet est au cœur d'une collaboration étroite entre le BIPM et le Comité sur les données (CODATA).

M. Ullrich explique que le Groupe de travail du CIPM sur le SI numérique a pour objectif à long terme de créer un cadre de travail qui suive les principes FAIR (en respectant les contraintes privées et commerciales) et de garantir que tous les aspects du système international de mesures – les résultats de mesure, leur incertitude, leur traçabilité, et leur provenance – puissent être évalués et interprétés numériquement, ce qui permettrait une communication et une analyse de machine à machine. M. Ullrich présente un livre blanc sur les scénarios d'évolution numérique de la normalisation et des normes[25] où sont définis cinq niveaux de numérisation applicables aux normes SMART **(**Standard Machine Applicable Readable Transferable**)**. Un document numérique, un PDF par exemple, est dit de niveau 1. Un document est dit de niveau 2 s'il peut être lu par une machine ; c'est le cas des documents XML. Les niveaux 1 et 2 représentent la situation actuelle. Les formats numériques de niveau 3 à 5 exigent des unités et des représentations de grandeurs capables d'interagir. Le contenu de niveau 3 doit pouvoir être lu et exécuté par une machine, celui de niveau 4 interprété et celui de niveau 5 manipulé automatiquement. Selon M. Ullrich, le développement du niveau 5 doit démarrer sans plus tarder, particulièrement en ce qui concerne la terminologie.

Le CIPM a créé le Groupe de travail du CIPM sur le SI numérique au cours de sa 108e réunion, en novembre 2019. Le groupe de travail bénéficie du soutien technique d'un groupe d'experts du monde entier. Le Groupe a pour objectif à long terme d'établir un cadre numérique fondé sur le SI qui soit universellement reconnu, uniforme, sans ambiguïtés, fiable et faisant autorité. Il poursuit cette initiative en étroite collaboration avec les parties prenantes de l'infrastructure de la qualité au niveau mondial. Le premier séminaire sur le sujet, « The International System of Units (SI) in FAIR digital data », organisé en ligne en février 2021, a réuni plus de 700 participants venant de l'infrastructure internationale de la qualité, de la recherche, de l'industrie, des laboratoires nationaux de métrologie et des organisations régionales de métrologie. Ce séminaire a notamment donné naissance à une « Déclaration commune d'intention sur la transformation numérique » co-signée par huit organisations internationales. M. Ullrich cite la phrase suivante de la déclaration : « *Nous, signataires, nous engageons à soutenir, de la façon la plus adaptée à chaque organisation, le développement, la mise en œuvre et la promotion du cadre numérique du SI dans un contexte plus large de transformation numérique de l'infrastructure scientifique et de la qualité au niveau mondial* ». Cet extrait significatif reconnaît l'existence de procédures propres à chaque organisation. Les signataires de la déclaration commune doivent se rencontrer en février 2023 pour une première réunion. M. Ullrich ajoute que le soutien des États est désormais nécessaire pour donner un impact encore plus important à la transformation numérique.

M. Ullrich présente le texte du Projet de résolution B et rappelle que la réussite de la mise en œuvre d'une transformation numérique intégrale exige une participation active de toutes les parties prenantes. Il salue les efforts récemment menés pour formuler les lignes directrices d'une transformation numérique de la métrologie et créer une structure de gouvernance flexible et ouverte afin de soutenir le développement et la mise en œuvre de cette transformation. L'adoption du Projet de résolution B devrait conduire à la mise en place d'un forum de discussion sur le rôle de la métrologie et de l'infrastructure de la qualité dans le monde numérique. Ce forum rassemblerait les comités consultatifs,

[25] https://www.din.de/resource/blob/801106/0251eb1280a9a97e53285d42d3bf1fea/whitepaper-idis-en-data.pdf

les laboratoires nationaux de métrologie, les organisations régionales de métrologie et les parties prenantes issues, notamment, de l'infrastructure de la qualité. Un projet de déclaration concernant la mission du forum a déjà été présenté et le forum devrait se réunir pour la première fois en février 2023.

M. Ullrich encourage les délégués de la CGPM à adopter le Projet de résolution B. Il mentionne l'article « Stop squandering data and make units of measurements machine readable »[26] (Non au gaspillage de données : comment rendre les unités de mesures lisibles par ordinateur), paru dans *Nature*, et cite d'autres évènements qui ont eu pour objectif de promouvoir la transformation numérique, parmi lesquels la conférence SciDataCon organisée par CODATA le 22 juin 2022, le webinaire de l'ILAC du 30 juin 2022 et la session animée par le CIPM lors de la conférence TC6 de l'IMEKO en septembre 2022. Il conclut son intervention en rappelant que la Convention du Mètre constitue une plateforme idéale pour développer des données de mesure interopérables et intelligibles par des ordinateurs.

Le président remercie M. Ullrich et demande s'il y a des questions.

Un membre de la délégation allemande remercie M. Ullrich pour sa présentation et salue l'action du groupe de travail. Il remarque que M. Ullrich a mis l'accent sur la transformation numérique comme suite logique de la redéfinition du SI et rappelle qu'il convient d'envisager cette transformation dans son entièreté et d'inclure l'infrastructure de la qualité et tous ses acteurs dans les discussions. Il demande à M. Ullrich de détailler les difficultés majeures à surmonter pour réaliser la vision stratégique d'un cadre numérique pour le SI dans les dix prochaines années. M. Ullrich répond que l'un des défis les plus importants sera de s'assurer que la Convention du Mètre adopte naturellement le rôle d'ancrage de confiance pour la métrologie à l'ère du numérique. Toutes les actions entreprises en matière de transformation numérique de la métrologie, telles que le développement de formats de métadonnées ou de certificats d'étalonnage numériques, devront découler de cette conception du SI comme fondement de la confiance mutuelle. À long terme, l'élaboration d'une terminologie efficace sera également un défi. Un cadre unique pour chaque donnée doit être défini et doit pouvoir être lu par machine. Les chercheurs en mathématiques axiomatiques qui participent à la normalisation s'attachent désormais à développer une terminologie. La langue employée en métrologie devra être synthétisée afin de répondre à des normes compréhensibles par les ordinateurs. M. Ullrich observe qu'il s'agit de tâches d'ampleur qui représentent d'importants défis.

M. Aigar Vaigu (Estonie) explique que l'Estonie propose des services publics numériques depuis plus de 20 ans et jouit donc d'une grande expérience dans l'administration et la gouvernance numériques. Le gouvernement estonien estime par conséquent que la simple transformation numérique du SI n'ira pas assez loin tant qu'elle sera suivie d'une impression de tous les résultats sur papier. Les PDF, si courants désormais, ne sont que des représentations électroniques de feuilles de papier. Selon M. Vaigu, les processus qui entourent le SI doivent aussi passer au numérique. Il défend un changement de mentalité qui ne s'arrêterait pas au SI mais comprendrait également tous les processus attenants. Avec des processus véritablement numériques, chaque action, chaque changement apporté aux données laissent des traces. Il est alors possible de corriger des erreurs ou de découvrir des tendances cachées jusque-là. Une vraie traçabilité et une vraie transparence permettront à la communauté de la métrologie de changer le monde. Toutefois, un grand pouvoir implique de grandes responsabilités. M. Vaigu considère que le Projet de résolution B constitue un bon point de départ mais qu'il faudra accentuer la cadence pour se préparer à l'avenir. Le CIPM peut ouvrir la voie mais le changement devra venir des laboratoires nationaux de métrologie et de la mentalité qui y règne. Si le CIPM indique la direction, charge aux laboratoires nationaux de métrologie de la suivre. M. Ullrich remercie M. Vaigu pour ses remarques et son soutien envers le projet de résolution. Il ajoute que le CIPM a défini la marche à suivre et souhaite passer à la transformation numérique des processus.

[26] Hanisch R. et al., Stop squandering data and make units of measurements machine readable, 2022, *Nature*, **605**, 222-224. https://doi.org/10.1038/d41586-022-01233-w

M. Ullrich a conscience de l'avance qu'a prise l'Estonie dans la transformation numérique de ses procédures : il confirme la nécessité d'accélérer le mouvement et manifeste à nouveau son souhait de voir le Projet de résolution B adopté par la CGPM.

35. Synthèse des discussions suite à la réunion informelle sur la dotation

M. Louw, président du CIPM, présente un rapport succinct sur les discussions qui se sont tenues lors de la réunion informelle du 16 novembre 2022. Il rappelle qu'une réunion préparatoire a été organisée le lundi 14 novembre. Il estime que la réunion sur la dotation a été fructueuse et efficace.

M. Louw souligne que, malgré le soutien général exprimé vis-à-vis de la dotation proposée, il est important si certains délégués ont des préoccupations qu'ils les partagent lors de cette présentation. Il rappelle aux délégués qu'il est préférable de soulever toute question qui demeurerait afin de pouvoir en discuter, et ce avant le vote du 18 novembre qui constitue un moment essentiel de la Conférence. Si la dotation n'est pas votée au cours de cette réunion, le CIPM devra convoquer une réunion extraordinaire de la CGPM afin de finaliser le processus. M. Louw précise que les délégués en ligne peuvent directement faire part de leurs préoccupations en utilisant la fonction « chat ».

M. Abdu Abagibe Adem (Éthiopie) fait un commentaire qui ne concerne pas la dotation en demandant s'il serait possible d'inclure au plan stratégique le fait de promouvoir les questions de qualité dans les pays en développement, ce qui permettrait à ces pays d'améliorer leur système qualité et leur compétitivité. M. Louw remercie M. Adem et souligne que l'Éthiopie est en train de mettre en place un nouveau laboratoire de métrologie et que ce pays met tout en œuvre pour améliorer ses infrastructures. Il ajoute que bien que le sujet du développement n'ait pas été explicitement intégré à la stratégie, l'essence du Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre » est de montrer que c'est une question de haute importance pour le CIPM et qu'il pourrait être nécessaire de la rendre plus visible.

36. Rapport des co-présidents du Groupe de travail *ad hoc* des représentants des États Membres

M. Robert Gunn (Royaume-Uni) et Mme Daniela Arruda Benjamin (Brésil), co-présidents du Groupe de travail *ad hoc* des représentants des États Membres, présente le travail effectué. Ils rappellent que l'objectif du Groupe est d'échanger sur des questions institutionnelles. Conformément à ses termes de référence, le Groupe de travail a examiné les rôles, responsabilités et relations des organes mis en place par la Convention du Mètre, en clarifiant comment distinguer au mieux le travail qu'ils effectuent tout en prenant en considération les principes de clarté et de transparence, afin d'aider les États Membres à préparer la 27e réunion de la CGPM. En se fondant sur ces principes, des discussions utiles ont été menées au sein du Groupe de travail. Toutefois, le Groupe de travail n'a pas été en mesure de se réunir autant qu'il l'avait prévu en raison de la pandémie.

Mme Benjamin explique de façon succincte le processus suivi par le Groupe de travail pour collecter des informations : le groupe a notamment recueilli par courriel la position des représentants des États Membres, partagé des documents via un site internet, et organisé quatre réunions en ligne. Un document de réflexion a ensuite été rédigé afin d'identifier les points de convergence et de

divergence. Le Groupe de travail n'a pas été en mesure de parvenir à un consensus sur toutes les questions qu'il a étudiées ; il a cependant été possible d'identifier certains sujets où les avis convergent. Un consensus s'est dégagé concernant le fait que la Convention du Mètre, signée le 20 mai 1875, a créé une organisation internationale composée de trois organes disposant de rôles spécifiques. De ce fait, le Groupe de travail a été en mesure de clarifier les termes utilisés pour faire référence aux États Parties à la Convention du Mètre. Un second point important souligné par les États Membres est qu'il est nécessaire de définir clairement les rôles des différents organes de l'organisation et leurs relations. Le CIPM, avec lequel le Groupe de travail a étroitement collaboré, a convenu que ces questions doivent être davantage examinées et prévoit de préparer des by-laws et des règles de fonctionnement pour l'organisation qui seront soumis à l'approbation de la CGPM lors de sa prochaine réunion en 2026. Ce travail est décisif car il permettra d'améliorer la transparence et l'efficacité de l'organisation. Il est également essentiel de s'assurer que les États Membres auront l'occasion de donner leur point de vue sur ces documents.

Mme Benjamin espère que les by-laws établiront des principes clairs et serviront de référence aux États Membres. Des progrès ont été effectués quant à la façon de procéder pour préparer les by-laws et la CGPM est encouragée à inviter le CIPM à être aussi inclusif que possible dans le développement des by-laws.

Un autre point important qui a été discuté au sein du Groupe de travail est de s'assurer que l'Organisation continue d'exploiter de manière généralisée les nouvelles technologies et les nouveaux outils virtuels utilisés lors de la pandémie de Covid-19. L'utilisation de ces outils a permis d'assurer la continuité du travail du groupe et renforcera les interactions avec les États Membres entre deux réunions de la CGPM. En outre, ces nouvelles technologies et ces nouveaux outils virtuels ont contribué à augmenter le nombre de délégués qui ont participé aux discussions techniques. Pour conclure, la CGPM devrait confier au CIPM la mission de rédiger des by-laws et des règles de fonctionnement puis de les soumettre pour approbation à la CGPM à sa prochaine réunion.

Le président de la CGPM remercie Mme Benjamin et M. Gunn et ouvre la discussion.

M. Kühne (Allemagne) déclare que les by-laws devraient être préparés en collaboration étroite avec les représentants des États Membres. Il espère qu'il sera possible lors de la prochaine réunion de la CGPM d'approuver les by-laws et de mettre ainsi un terme à ces questions.

Mme Chambon (France) rappelle que la France est dépositaire du traité. Il est clair pour la France qu'il n'existe pas de confusion : le BIPM est l'organisation internationale créée en 1875, et ce depuis presque 150 ans. Cette organisation internationale est un exemple de la coopération scientifique mondiale ; pour la France, il n'y a pas de question quant au nom de l'organisation. Mme Chambon souligne que les by-laws permettront de clarifier certaines règles applicables aux organes et au rôle du directeur. Elle répète qu'il est clair, pour la France, que le nom de l'organisation internationale est le BIPM.

Mme Benjamin observe, comme mentionné dans sa présentation, que cela a constitué le point de discussion le plus controversé et celui ayant suscité le plus de débats, reflétant ainsi combien les États Membres sont attachés à l'organisation. Elle précise qu'il n'existe aucune proposition, à cette étape, de donner un nouveau nom ou de changer le nom de l'organisation. Ce qui est proposé, dans un souci de clarté, est de s'assurer lors des discussions sur les by-laws de savoir clairement à quoi il est fait référence. Il n'est pas suggéré de prendre une décision concernant le nom, ni même de poursuivre une discussion sur le nom.

Mme Saundry (États-Unis d'Amérique) remercie Mme Benjamin et M. Gunn d'avoir présidé le Groupe

de travail, en particulier lors de la pandémie de Covid-19, lorsque le travail a été effectué en ligne et par échange de courriels. Elle reconnaît que les questions du nom et des rôles ont suscité de nombreuses discussions et convient que les by-laws devront clairement indiquer à quoi il est fait référence lors de la description de certaines fonctions.

M. Gunn conclut en exprimant ses remerciements à tous ceux qui ont apporté leur contribution et sans lesquels le travail n'aurait pas pu être effectué.

Cinquième séance – 17 novembre 2022 (après-midi)

Le président de la réunion souhaite la bienvenue aux délégués pour la cinquième séance.

37. La métrologie du temps et des fréquences dans les missions spatiales

M. Benedicto, directeur de la navigation à l'Agence Spatiale Européenne (ESA), indique que l'ESA développe des systèmes de navigation par satellite depuis 30 ans et exploite actuellement deux systèmes principaux : l'European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) et Galileo. Ces systèmes qui fournissent leurs services à des milliards d'utilisateurs à travers le monde reposent sur des techniques de dissémination du temps et des fréquences.

M. Benedicto souligne les besoins des missions spatiales en matière de métrologie du temps et des fréquences et remarque que ces besoins découlent d'exigences diverses. Le bon fonctionnement de ces missions repose sur l'émission de signaux de temps depuis des satellites qui peuvent être stables ou ultra-stables. Ces signaux doivent être horodatés à bord des satellites en se fondant sur des références de temps et ils sont le plus souvent synchronisés avec les horloges au sol. Certaines missions exigent un degré élevé d'autonomie par rapport à la Terre, c'est le cas des missions d'exploration que des satellites exécutent à des millions de kilomètres de notre planète. Les exigences métrologiques en matière de temps et fréquences sont spécifiques à chaque mission et il n'existe pas de méthode par défaut pour mesurer le temps à bord d'un satellite : tout dépend du type de mission effectuée.

L'ESA mène un certain nombre de missions essentielles qui reposent sur le calcul du temps pour produire des données de qualité. Gaia, considérée comme l'une des missions scientifiques les plus remarquables, collecte une quantité importante de données scientifiques destinées à cartographier la galaxie en trois dimensions, qui nécessitent un horodatage précis. En l'absence d'horodatage, les informations sont très difficiles à reconstruire au cours du travail de cartographie effectué sur Terre. L'horodatage à bord de Gaia s'effectue à l'aide d'une horloge atomique à rubidium dont la stabilité en fréquence correspond à une dérive de moins de 17 nanosecondes toutes les six heures. L'émetteur comme le récepteur de la mission Cassini-Huygens, dédiée à l'exploration de Saturne et de sa lune Titan, utilisaient des horloges à rubidium. La mission Gravity Probe-A, menée par les États-Unis en 1976, a permis de démontrer pour la première fois depuis l'espace la théorie d'Einstein du « décalage vers le rouge » à l'aide d'un maser à hydrogène.

La mission chinoise Mengtian, lancée en octobre 2022 et faisant désormais partie de la station spatiale chinoise, embarque à son bord plusieurs horloges de très haute précision. La mission European Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) embarque deux types d'horloges, dont l'une nommée PHARAO est une horloge atomique à césium refroidi par laser qui offre une stabilité très élevée, ce qui en fera certainement l'horloge la plus précise en orbite. Elle est associée à une autre horloge, SHM, un maser à hydrogène actif. Le lancement de la mission ACES est prévu pour 2025.

M. Benedicto indique que le système Galileo est opérationnel et compte 28 satellites en fonctionnement, embarquant chacun quatre horloges ultra-stables. Ces horloges exploitent deux technologies différentes, les masers à hydrogène passifs d'un côté et les horloges à rubidium de l'autre. Galileo est un atout d'une importance cruciale qui fournit des services de navigation par satellite (GNSS) et contribue très efficacement à la gestion internationale du temps. Quatre systèmes globaux de navigation par satellite sont actuellement en service : GPS (États-Unis), Galileo

(Union européenne), GLONASS (Fédération de Russie) et BeiDou (Chine). Les quatre reposent sur des techniques de mesure du temps afin de fournir leurs services de positionnement. M. Benedicto résume brièvement le fonctionnement des systèmes de navigation par satellite. Tous les satellites sont synchronisés avec un temps système généré par des horloges atomiques. Les données de position et de temps du satellite sont estimées par le segment sol. Chaque satellite transmet son identifiant, sa position, sa donnée de temps ainsi que son état de fonctionnement sous la forme d'un message de navigation. L'utilisateur se fonde sur des mesures de temps pour calculer la distance qui le sépare de chaque satellite puis son emplacement. Afin de simplifier l'équipement des utilisateurs, au moins quatre mesures différentes sont nécessaires. Les systèmes de navigation par satellite fournissent des informations de temps, de positionnement et de vitesse aux utilisateurs. Puisque ces systèmes reposent sur le Temps universel coordonné (UTC), la question de la seconde intercalaire, qui sera abordée à nouveau au cours de cette conférence, est d'une importance cruciale pour l'ensemble des systèmes de navigation par satellite.

En matière de temps, chaque système de navigation par satellite doit disposer de son autonomie. Il est nécessaire de connaître le décalage qui sépare les horloges des satellites de leur temps système ainsi que le décalage de celui-ci vis-à-vis de l'UTC. Les fournisseurs de services GNSS doivent se rapporter au temps terrestre à l'aide d'une référence très précise telle que le décalage entre UT1 et UTC. Le document de contrôle des interfaces, *Signals-in-space*, publié dans le cadre de Galileo contient des informations spécifiques sur tous ces paramètres. Les informations sont représentées sous deux formes différentes : le décalage entre le temps du système Galileo (GST) et l'UTC est diffusé à tous les utilisateurs de la constellation Galileo ; le décalage entre le temps du système Galileo et celui du système GPS est également diffusé. Ce second décalage est important en ce qu'il garantit une interopérabilité au niveau du récepteur entre les mesures des signaux du GPS et celles des signaux de Galileo.

M. Benedicto explique qu'un moyen très précis de contrôler le temps de plusieurs systèmes GNSS à la fois est nécessaire pour fournir ces services. Des infrastructures dédiées ont été développées et déployées dans les centres techniques des systèmes GNSS afin de surveiller en temps réel tous les paramètres de temps transmis par les signaux des différents systèmes. Si le « temps » paraît simple, il pose un certain nombre de difficultés du point de vue opérationnel. Il est d'abord requis de considérer l'UTC comme une référence reconnue au niveau international. Pour être opérationnels et éviter le risque de panne, les systèmes doivent reposer sur une échelle de temps continue et en temps réel. La synchronisation du temps du système Galileo avec l'UTC s'effectue au sol grâce à des algorithmes dits « modulo 1 seconde ». Cette spécificité de Galileo ne se retrouve pas dans le système russe GLONASS. Étant donné que la nécessité d'introduire des secondes intercalaires fluctue dans le temps, l'insertion doit être prise en charge manuellement. Ce fut le cas pour la dernière fois en 2016, lorsque des corrections manuelles ont dû être mises en œuvre sur les segments sol et dans les messages de navigation transmis aux utilisateurs.

Chaque ajout d'une seconde intercalaire risque d'interrompre le fonctionnement du système. En 2016, l'intégralité des utilisateurs de Galileo ont dû être informés de l'introduction d'une seconde intercalaire dans la marche du système, ce qui a entraîné une interruption des activités de routine des services. Certains récepteurs ne maîtrisent pas correctement la procédure de mise en œuvre de la seconde intercalaire. Chaque système GNSS utilise un protocole d'horodatage différent pour les secondes de son temps système et une procédure spécifique de transmission de son temps système par rapport à l'UTC. De plus, les méthodes de mise en œuvre de la seconde intercalaire diffèrent selon les systèmes, en particulier dans les cas de Galileo et GLONASS. Tout ceci menace l'interopérabilité des systèmes et génère confusion et incertitude pour les utilisateurs qui reçoivent des signaux. De plus, certaines applications au niveau utilisateur se servent directement du temps système calculé par des systèmes tels GPS ou Galileo comme référence d'horodatage. C'est notamment le cas des réseaux de

télécommunications, d'énergie, de distribution d'électricité et de gaz qui assurent leur synchronisation à l'aide des temps du GPS ou de Galileo. L'horodatage utilisé pour les transactions financières est précis à la nanoseconde près et repose sur des références de temps directement adossées au GPS ou à Galileo. Toutefois, chaque système crée sa propre référence de temps, ce qui multiplie les notions différentes du temps à travers le monde et engendre de plus en plus de problèmes. La suppression de la seconde intercalaire simplifierait l'exploitation des systèmes GNSS et améliorerait leur interopérabilité. Les signaux GNSS deviendraient plus simples à utiliser tout en évitant des transitions au niveau des opérations du système comme au niveau des utilisateurs. La communauté utilisant les systèmes de navigation par satellite fait également face à l'éventualité d'une première « seconde intercalaire négative » en réponse à l'accélération de la rotation de la Terre. Cette procédure, qui n'a jamais été mise à l'épreuve de la réalité, est source d'inquiétude et de confusion.

M. Benedicto présente deux exemples de futurs projets d'amélioration des horloges embarquées dans les satellites destinés à améliorer l'exactitude des temps GNSS : l'horloge atomique optique à atomes froids de strontium actuellement développée par l'Observatoire de Paris/SYRTE, et la NASA Deep Space Atomic Clock (DSAC), qui seront bientôt en orbite et offriront des exactitudes inégalées. Un programme conséquent destiné à mettre au point des horloges atomiques embarquées reposant sur de nouvelles technologies est actuellement mené à bien en Europe dans le cadre du projet Galileo. Ces horloges doivent, à long terme, remplacer les horloges à rubidium et des masers à hydrogène passifs actuellement embarqués dans les satellites. L'ESA envisage diverses technologies pour améliorer la robustesse en orbite. Elle s'intéresse également à une combinaison de plusieurs technologies qui offrira une stabilité très élevée à court terme et élevée à long terme. Ces deux facteurs combinés permettent d'atteindre une grande efficacité opérationnelle. On compte parmi ces technologies l'horloge optique à rubidium à deux photons, l'horloge optique à iode, l'horloge à rubidium pulsé à pompage optique et l'horloge à césium à pompage optique.

De nombreux projets sont en cours de développement en Europe, financés par l'Agence Spatiale Européenne et par l'Union européenne. Le budget de l'Agence Spatiale Européenne pour les années à venir sera examiné au cours de la conférence ministérielle de ses États membres qui se tiendra en novembre 2022. La Direction de la navigation proposera deux missions innovantes et très ambitieuses. Le programme Genesis embarquera pour la première fois un ensemble de quatre technologies de navigation géodésiques différentes à bord du même satellite. Ce dispositif permettra l'étalonnage en un même lieu des quatre instruments de mesure afin d'améliorer de façon significative l'évaluation de la précision du Système international de référence terrestre (ITRF). La mission se fixe l'objectif ambitieux de déterminer une solution technique pour étalonner l'ITRF avec une précision pouvant atteindre un millimètre et ne dérivant que de 0,1 millimètre au fil des années. Cette mission offrira un référentiel très précis à l'ITRF. Genesis contribuera également à l'observation et à l'étalonnage des paramètres de rotation de la Terre, qui ont une importance indirecte pour l'étude de l'évolution sur le long terme des références de temps internationales. La seconde initiative de l'ESA se nomme Moonlight. La mission proposée vise à créer le premier réseau de communication et de navigation par satellite en orbite et à la surface de la Lune. La mission Moonlight mettra en place une constellation de satellites autour de la Lune et mettra en évidence de nouveaux défis qui devront être relevés afin de pouvoir explorer la Lune.

M. Benedicto conclut en rappelant les points essentiels de son intervention. Une échelle de temps continue représente un véritable avantage pour les activités de tous les systèmes spatiaux. Chacun des systèmes spatiaux que l'ESA met en œuvre a ses exigences spécifiques, cependant, celle d'une échelle de temps continue est commune à tous. Les systèmes spatiaux doivent reposer sur des échelles de temps en temps réel avec un niveau élevé de continuité, de disponibilité et de fiabilité. Une grande attention doit être portée au choix de la technologie employée, plusieurs exemples de diversification des technologies ont été mentionnés. Chacune des technologies exploitées par un satellite doit être fiable et opérationnelle dans

l'espace. Les systèmes spatiaux doivent être synchronisés avec une référence reconnue située au sol telle que l'UTC. Les systèmes GNSS transmettent par leurs signaux une « prédiction de l'UTC » en fournissant les paramètres de décalage avec les signaux en temps réel envoyés aux utilisateurs. Ainsi, les fournisseurs de services GNSS contribuent à fournir un service de temps UTC universel et en temps réel. Le décalage UT1-UTC doit être connu avec la plus grande exactitude possible, de l'ordre des microsecondes. À l'avenir, de meilleures horloges présentant une stabilité et une précision plus élevées seront nécessaires pour améliorer l'exactitude du temps GNSS. La robustesse des technologies des horloges sur lesquelles s'appuient les systèmes GNSS doit également être améliorée.

M. Benedicto souligne que l'exploration spatiale repose sur l'interopérabilité entre la métrologie du temps et les systèmes de référence. La collaboration avec la communauté de la métrologie est selon lui essentielle. Il invite les délégués de la CGPM à prendre part aux discussions à venir et à contribuer à l'effort universel visant à soutenir la définition de référence, dans lequel l'ESA et ses partenaires internationaux sont pleinement engagés.

Le président ouvre la discussion.

M. Ullrich (CIPM) demande si l'ESA prévoit d'équiper ses satellites géostationnaires d'horloges optiques. Il ajoute que la Chine envisage déjà cette technologie qui lui fournirait une échelle de temps d'une précision de l'ordre de 10^{-18}. M. Benedicto répond que les systèmes de navigation par satellite sont construits autour d'une combinaison de satellites en orbite géostationnaire et en orbite terrestre moyenne. L'avenir verra le déploiement de satellites en orbite terrestre basse. Il confirme que l'ESA compte équiper des satellites de navigation avec des horloges optiques et que ce projet est déjà en bonne voie.

38. Horloges optiques d'une précision de l'ordre de 10^{-18} : défis et applications

M. Christophe Salomon, directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), rappelle qu'il a participé à la 27e réunion de la CGPM en 2018 et assisté au vote historique de l'adoption du SI révisé. La seconde reste la dernière unité à ne pas encore avoir été redéfinie. M. Salomon donne une vue d'ensemble des technologies d'horloges et évoque en particulier l'état actuel des horloges optiques, qui parviennent désormais à une stabilité de fréquence relative de l'ordre de 10^{-18}. Pour illustrer ce niveau d'exactitude, il explique que si, lors de la création de l'univers il y a 14,5 milliards d'années, deux horloges avaient commencé au même moment à mesurer le temps, leur écart actuel serait de moins d'une seconde, ce qui montre l'extrême stabilité de ce type d'instruments.

Les horloges optiques, utilisées au sol, dans des laboratoires ou dans l'espace, ont une vaste gamme d'applications. Art Schawlow, lauréat du prix Nobel pour l'invention du laser, déclarait en 1981 que pour mesurer quelque chose avec précision, il fallait mesurer sa fréquence. Pour parvenir à une mesure de haute précision, il faut concevoir le dispositif de manière à finir par mesurer une fréquence. C'est à partir de ce concept que toutes les unités du SI révisé ont été redéfinies. La seconde est à la base de toutes les mesures de précision modernes puisque le temps est la grandeur mesurée avec la plus grande précision du monde physique.

L'idée d'horloge est née en comptant les oscillations du pendule de Galilée. Les horloges optiques modernes reposent sur des signaux électromagnétiques qui oscillent au rythme de 10^{15} cycles par seconde. Un décompte des oscillations sur une période plus courte permet des mesures plus précises d'intervalles de temps. M. Salomon décrit la théorie sur laquelle se fonde l'horloge atomique, un système composé d'un oscillateur physique, à quartz par exemple, et d'un laser. La définition actuelle de la seconde est obtenue en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{Cs}$, la fréquence de la transition

hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1}. L'utilisation de l'atome de césium offre un caractère universel à l'expérience, la mécanique quantique déterminant la position de ses niveaux d'énergie. L'oscillation est celle d'un champ lumineux qui excite les atomes de césium depuis leur état fondamental *f* vers leur état excité *e*. La différence d'énergie entre ces deux états est exprimées par la relation de Planck-Einstein. L'oscillateur physique, qu'il s'agisse d'un quartz ou d'un laser, est également sujet à ce décalage. L'horloge combine ainsi la stabilité intrinsèque de la différence de niveau d'énergie d'un atome avec un oscillateur physique. Les fontaines atomiques à césium sont exploitées depuis 30 ans et sont utilisées dans de nombreux laboratoires nationaux de métrologie. M. Salomon indique que le Temps atomique international (TAI) calculé par le BIPM repose sur douze fontaines à césium répandues à travers le monde et comparées à l'aide du GPS et de fibres optiques : ces horloges présentent une exactitude de 2×10^{-16}.

M. Salomon présente la formule permettant de calculer le « facteur de mérite d'une horloge » :

$$\mathcal{F} = \nu / \Delta\nu \times S/N = 2\ \nu\ T\ S/N$$

Fréquence : ν

Largeur de la résonance et temps d'interaction : $T\ \Delta\nu=1/2T$

Rapport signal sur bruit : S/N

Pour les fontaines à césium opérant dans le domaine micro-ondes, $\mathcal{F} = 5 \times 10^{-13}$, tandis que pour les horloges optiques, $\mathcal{F} = 5 \times 10^{-16}$. Le rapport signal sur bruit des horloges optiques s'améliore sans avoir encore atteint cette valeur ; toutefois, M. Salomon explique qu'il n'y a pas d'obstacle fondamental qui empêche d'y parvenir. Il remarque que deux familles d'horloges optiques coexistent : certaines utilisent des ions piégés, d'autres des atomes neutres. Un travail considérable est dédié à chaque type d'horloges optiques. M. Salomon explique qu'au moment de la redéfinition de la seconde en 1967, le temps était mesuré avec une exactitude de l'ordre de 10^{-12}. L'exactitude des étalons à césium (micro-ondes) s'est depuis améliorée d'un facteur dix tous les dix ans pour parvenir à 1×10^{-16} en 2020. Les étalons de fréquence optiques, qui émettent dans le spectre visible, se trouvaient aux alentours de 10^{-12} avant l'an 2000, jusqu'à ce que John Hall et Theodor Hänsch reçoivent le prix Nobel de physique en 2005 pour avoir élaboré la technique des peignes de fréquences optiques, un nouveau moyen de mesurer des fréquences optiques. L'exactitude des étalons optiques a ainsi atteint 10^{-18} en 2020.

M. Salomon présente la technologie utilisée par les horloges à ^{87}Sr. L'oscillateur d'interrogation est un faisceau laser stabilisé dans une cavité en silicium à basse température. Les atomes d'intégration sont confinés dans un réseau optique, avec 5 à 10 atomes piégés à chaque potentiel pour conserver une densité faible. Piéger les atomes sans perturber leurs niveaux d'énergie est rendu possible par l'utilisation d'une « longueur d'onde magique », où le décalage du spectre lumineux de l'état fondamental des atomes est égal au décalage du spectre lumineux des atomes excités. Les deux niveaux d'énergie sont perturbés par le faisceau laser, mais ils le sont exactement de la même manière (de l'ordre de 10^{-6} ou 10^{-7}). Hidetoshi Katori a inventé cette technique de la longueur d'onde magique en 2003. Le facteur de mérite des horloges optiques à ^{87}Sr est extrêmement élevé du fait de la technique de conservation du décalage du spectre lumineux. Les horloges à strontium passent en dessous du niveau de 10^{-18} en termes de stabilité de fréquence, avec une exactitude également proche de 10^{-18}, ce qui correspond à la différence de décalage vers le rouge gravitationnel occasionnée par un déplacement vertical d'environ 1 cm. Ces résultats offrent de nouvelles applications aux horloges dans le domaine de la géodésie puisqu'il sera possible de mesurer localement le potentiel gravitationnel d'une horloge et de détecter d'éventuels changements résultant, par exemple, d'une élévation ou d'un affaissement de la croûte terrestre en raison de la fonte des glaces provoquée par le changement climatique.

Un groupe de chercheurs du JILA (États-Unis)[27] a démontré l'extraordinaire stabilité que ces horloges peuvent atteindre. La fréquence d'horloge de la partie supérieure d'un échantillon d'atomes long d'un millimètre a été mesurée et comparée à la fréquence de la partie inférieure de l'horloge. Une différence de décalage vers le rouge a pu être observée à l'échelle d'un millimètre. La mesure de ce décalage de fréquence de l'ordre de 10^{-19} a été réalisée avec une incertitude de 10 %. La capacité de l'horloge à effectuer des mesures différentielles est donc excellente, avec une exactitude qui descend sous les 10^{-20}. M. Salomon indique qu'un groupe de chercheurs du Japon, dirigé par Hidetoshi Katori, a mis au point des horloges optiques transportables qui ont été utilisées pour vérifier l'effet Einstein (une horloge située en altitude tourne plus vite qu'une autre située à une altitude plus faible) depuis la tour radio Tokyo Skytree[28], à 450 m d'altitude. Le décalage vers le rouge gravitationnel a été mesuré à 21 hertz, exactement comme le prévoyait Einstein.

M. Salomon évoque pour conclure les futures applications des horloges optiques. Le rapport signal sur bruit des horloges optiques et des fontaines a atteint sa limite quantique, nommée « limite quantique standard ». En mécanique quantique, il existe une relation de commutation entre les différentes observables. À la limite quantique, la stabilité en fréquence est proportionnelle à la racine carrée du nombre d'atomes, et le bruit à l'inverse de la racine carrée : plus il y a d'atomes, moins il y a de bruit. La mécanique quantique permet toutefois des améliorations au-delà de cette limite. Il est possible de réduire le bruit quantique avec ce que l'on nomme un « système quantique intriqué ». La limite quantique standard pour les atomes non intriqués est égale à $1/N^{1/2}$. Intriquer des atomes permet d'atteindre un état stable en utilisant le nombre d'atomes et non la racine carrée de ce dernier, ce qui réduit le bruit. Une équipe de chercheurs de Stanford (États-Unis) a fait d'importants progrès dans ce domaine en mesurant un bruit 100 fois moins important que la limite quantique standard[29]. Les chercheurs ont effectué cette intrication dans une cavité optique dont le champ a permis de lier les atomes les uns aux autres. Une réduction du bruit de 20 dB a pu être obtenue sur la variance. Le rapport signal sur bruit a ainsi été amélioré d'un facteur 10.

M. Salomon explique que les horloges optiques ont désormais deux ordres de grandeur d'avance sur les horloges micro-ondes. Leurs variations quotidiennes sont comprises entre 0,1 et 1 picoseconde. Une nouvelle définition de la seconde est nécessaire à partir de l'une des trois options suivantes : l'utilisation d'une espèce atomique, celle d'une combinaison de transitions atomiques[30], ou bien la valeur fixée d'une nouvelle constante fondamentale telle que la masse d'un électron. Les débats sur la redéfinition de la seconde devront porter sur le calendrier de cette redéfinition ainsi que sur les atomes à privilégier si l'une des deux premières options est choisie. Concernant l'avenir, M. Salomon indique que les liens par fibre optique et les peignes de fréquence permettent des comparaisons d'horloges optiques à l'échelle continentale et à des niveaux d'exactitude adéquats. Des missions satellites telles ACES permettront des comparaisons intercontinentales d'horloges au-delà de 10^{-17} d'ici 2025. Le décalage vers le rouge des horloges soumises à un potentiel de gravité, ou effet Einstein, permettra le développement d'une nouvelle géodésie relativiste à partir des horloges optiques. Les variations de potentiel de la Terre limiteront la précision des mesures de temps depuis le sol à 10^{-18} ou 10^{-19} (c'est-à-dire entre le cm et le mm). La solution réside dans le maintien d'une horloge de référence dans l'orbite haute de la Terre, où ces variations sont plus faibles. La métrologie quantique permettra d'améliorer les performances des horloges à l'aide de l'intrication quantique.

---

[27] Bothwell, T., Kennedy, C.J., Aeppli, A. et al. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature* **602**, 420-424 (2022). https://doi.org/10.1038/s41586-021-04349-7

[28] Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N. et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nat. Photonics* **14**, 411-415 (2020). https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8

[29] Pedrozo-Peñafiel, E., Colombo, S., Shu, C. et al. Entanglement on an optical atomic-clock transition. *Nature* **588**, 414-418 (2020). https://doi.org/10.1038/s41586-020-3006-1

[30] Jérôme Lodewyck 2019 *Metrologia* **56** 055009 https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab3a82

Le président remercie M. Salomon et demande s'il y a des questions.

M. Milton rappelle que la présentation a débuté avec la célèbre citation de Schawlow, selon laquelle il ne faut mesurer rien d'autre que des fréquences. Il note que temps et fréquence sont de parfaits équivalents, et ajoute que seules des techniques avancées permettent de passer d'un étalon de fréquence à une horloge. L'un des diagrammes affichés présentait une concavité cryogénique lors de l'utilisation de strontium comme étalon. M. Milton demande si des avancées liées à la compression de spin sont attendues et si les progrès des techniques de cavités optiques stables seront suffisants pour tirer des bénéfices de ces avancées et intégrer ces fréquences à des horloges.

M. Salomon répond que la technique de la cavité a connu de nombreuses améliorations : lorsque l'on interroge des atomes avec un laser qui présente de trop grandes fluctuations, aucun gain n'est obtenu concernant le rapport signal sur bruit, comme attendu. Dans cette situation, les atomes sont intrinsèquement si stables que l'« oscillateur local », le signal physique qui interroge les atomes, doit lui aussi être très stable. La cavité refroidie à 70 kelvins a permis de réduire les fluctuations thermiques. L'oscillateur local peut être résumé au bruit thermique du miroir. L'utilisation du miroir permet de répondre aux fluctuations thermiques, sa distance varie très légèrement et produit un bruit sur le laser. Le laser sert en effet de volant d'inertie et interroge les atomes toutes les trois secondes. Il existe donc un temps mort qui peut entraîner divers problèmes. La cavité, ou en réalité la sortie de l'horloge doivent donc être isolées afin de stabiliser le laser sur les atomes. Il est nécessaire d'améliorer le système de laser pour tirer parti de la cohérence accrue de l'interaction atome-lumière : ces deux améliorations progressent de concert. M. Salomon indique que la limite des horloges optiques n'a toujours pas été atteinte et qu'il faut s'attendre à voir des horloges atteindre des niveaux de 10^{-19} à 10^{-20} dans les années à venir. Il suggère à la communauté de la métrologie de redéfinir la seconde sans trop attendre, sinon le même problème se posera pour les unités électriques du SI telles que le courant électrique et la tension, définies à partir des effets Hall quantique et Josephson. La redéfinition de la seconde est bien entendu soumise à des conditions dont le CCTF débat de manière extensive. M. Salomon explique que ces conditions sont importantes car « on ne mesure jamais seulement une fréquence ». Les cycles doivent être retenus sans perte : le temps est un intervalle de temps sur lequel chaque cycle doit être compté, sans en perdre un seul. Pour cette raison, le laser pointé vers la cavité, ou oscillateur local, doit rester stable sur une très longue durée.

M. Steele (Canada) observe que M. Salomon dans sa présentation indique que l'utilisation d'une seule espèce atomique ou bien d'une combinaison de transitions atomiques étaient des options privilégiées par rapport à la masse d'un électron dans le cadre de la redéfinition de la seconde. Il demande à M. Salomon de commenter les deux options, celle d'une espèce unique et celle d'un ensemble d'espèces, et de détailler leurs avantages et inconvénients respectifs.

M. Salomon répond que les deux solutions ont leurs avantages et leurs inconvénients. Une solution à atome unique implique de choisir un atome, ce qui est loin d'être évident puisqu'ils sont plusieurs à avoir des performances très similaires, en particulier parmi les systèmes à atomes neutres. Actuellement, le choix d'une unique espèce atomique pourrait être arbitraire et présente un risque. Si une espèce est choisie et que dans cinq ans une nouvelle horloge atomique est développée, à l'aide de thorium par exemple, présentant des erreurs systématiques moindres que celle de l'espèce choisie, la communauté de la métrologie regrettera son choix. La seconde solution est plus complexe car elle nécessiterait d'effectuer une moyenne pondérée des horloges optiques. C'est toutefois la solution mise en œuvre pour la réalisation secondaire de la seconde par le CCTF et CODATA. Cette méthode est plus robuste puisque fondée sur les éléments actuellement disponibles. Toutefois, des questions se posent toujours quant au besoin et à l'éventuelle date d'une redéfinition ou d'un ajustement lié au poids. Cette définition peut être considérée comme évolutive, sa principale exigence est de maintenir une continuité. M. Salomon conclut en donnant son opinion personnelle sur la seconde intercalaire, qu'il qualifie de désastre. Il encourage la communauté de la métrologie à s'en défaire.

39. Rapport du président du CCTF

M. Noël Dimarcq, président du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), présente son rapport sur les activités du CCTF depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCTF

Le CCTF a consacré son travail des dernières années à quatre « sujets stratégiques », qui nécessiteront de prendre des décisions dans les années à venir :

1. la redéfinition de la seconde SI à partir d'une ou de plusieurs transitions optiques ;
2. une révision de la procédure concernant la seconde intercalaire en vue de réaliser un UTC continu ;
3. les exigences permettant d'étayer la traçabilité à l'UTC par des mesures fondées sur les systèmes GNSS ;
4. la création d'un projet de renforcement des capacités fondé sur des ressources partagées avec les laboratoires nationaux de métrologie, en partenariat avec l'*IEEE UFFC Society*, l'objectif étant de transférer la technologie permettant la réalisation d'une échelle de temps locale UTC(k) robuste et d'obtenir une implication plus large concernant la génération et la dissémination de l'UTC.

Un numéro spécial[31] de *Metrologia* portant sur ces sujets est en cours d'élaboration. De plus, deux projets de résolutions seront examinés au cours de la 27e réunion de la CGPM en novembre 2022 :

– le projet de résolution D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC »,
– le projet de résolution E « Sur la future redéfinition de la seconde ».

Domaine de compétence du CCTF

Les activités du CCTF concernent la définition et la réalisation de la seconde, la production et la diffusion du Temps atomique international (TAI) et du Temps universel coordonné (UTC), et les recommandations faites au CIPM en matière de temps et d'échelles de temps.

Stratégie

La mission du CCTF est de soutenir le développement d'étalons de fréquence, d'échelles de temps, ainsi que de méthodes de comparaison de temps et de fréquences pour répondre aux besoins de la société.

Activités et réalisations depuis la dernière réunion de la CGPM

Principales activités et réalisations

Afin de progresser sur les quatre « sujets stratégiques », le CCTF a créé des groupes d'étude au sein desquels 80 personnes collaborent en participant à des réunions bimestrielles, ateliers spécifiques, forums, congrès et discussions sur un forum en ligne hébergé par le compte GitHub du BIPM.

Ci-dessous la liste des groupes d'étude et leurs présidents :

Mise à jour de la feuille de route concernant la redéfinition de la seconde SI et critères obligatoires	(N. Dimarcq, P. Tavella)
Requêtes des communautés d'utilisateurs, laboratoires nationaux de métrologie et organismes de liaison	(M. Gertsvolf, CNRC ; G. Mileti, Université de Neuchâtel)

[31] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac98cb et https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac9da5

Étalons atomiques de fréquence et approches possibles pour une redéfinition de la seconde	(S. Bize, SYRTE ; E. Peik, PTB ; C. Oates, NIST)
Dissémination du temps et des fréquences et échelles de temps	(D. Calonico, INRIM ; T. Ido NICT)
Secondes intercalaires dans l'UTC et recherche d'un consensus sur une échelle de temps continue	(J. Levine, NIST ; P. Tavella, BIPM)
Promotion des bénéfices mutuels de l'UTC et du GNSS (y compris la traçabilité des signaux GNSS à l'UTC)	(P. Defraigne, ORB ; A. Bauch, PTB)
Partage des ressources afin d'améliorer la gestion internationale du temps	(M. Gertsvolf, CNRC ; Y. Hanado, NICT)

Le CCTF a émis des recommandations sur plusieurs des sujets stratégiques, dont certaines destinées à d'autres organisations auxquelles les activités et les recommandations du CCTF ont été présentées.

1. Sur la feuille de route concernant la redéfinition de la seconde :
   - deux recommandations ont été approuvées par le CCTF et le projet de résolution E est soumis à la CGPM.
2. Sur les secondes intercalaires dans l'UTC et la recherche d'un consensus sur une échelle de temps continue :
   - une recommandation a été approuvée par le CCTF et le projet de résolution D est soumis à la CGPM.
3. Sur la promotion des bénéfices mutuels de l'UTC et du GNSS (y compris la traçabilité des signaux GNSS à l'UTC) :
   - trois recommandations ont été approuvées par le CCTF.
4. Sur le partage des ressources afin d'améliorer la gestion internationale du temps :
   - une recommandation a été approuvée par le CCTF.

Trois recommandations supplémentaires, sur les étalons optiques de fréquence et sur les technologies de comparaison du temps, ont été approuvées par le CCTF.

Un numéro spécial de *Metrologia* est en cours d'élaboration. Il comprendra quatre articles sur les sujets suivants :

1. la présentation de la stratégie du CCTF ;
2. la feuille de route concernant la redéfinition de la seconde ;
3. la recherche d'un consensus sur un Temps universel coordonné continu[32] ;
4. la traçabilité à l'UTC à l'aide de mesures GNSS[33].

Un livre blanc couvrant chaque sujet stratégique doit être publié début 2023[34].

Défis et difficultés

Le CCTF a travaillé en étroite collaboration avec les organismes de liaison et tous les membres du CCTF pour parvenir à un consensus sur les projets de résolution présentés à la CGPM, au cours de plusieurs réunions, discussion en ligne, forums internationaux et congrès.

[32] https ://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac9da5
[33] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac98cb
[34] https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cctf/publications

Perspectives à court terme et à long terme

Le CCTF continuera à superviser des activités, initier et nourrir des réflexions, des études et des collaborations sur les sujets suivants :

- les étalons primaires et secondaires, en collaboration avec le CCL ;
- les méthodes de comparaison de temps et de fréquence : mesures GNSS, comparaisons bidirectionnelles sur satellite, techniques avancées comme la fibre optique, lien micro-ondes de la mission ACES, liens optiques dans l'espace ;
- les échelles de temps – TAI, UTC, UTCr, UTC(k) – et les algorithmes ;
- le CIPM MRA et la traçabilité métrologique.

Le CCTF continuera à soutenir les activités transversales liées aux sujets stratégiques, telles que décrites dans les feuilles de routes évoquées dans les projets de résolution D et E.

Données sur le CCTF

CCTF établi en 1956 sous le nom de Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), puis renommé CCTF en 1997.

Président : N. Dimarcq
Secrétaire exécutive : P. Tavella
Composition : 26 membres, 5 organismes de liaison, 4 observateurs
Liste des membres et observateurs : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cctf/members
Réunions depuis la dernière CGPM : 28-29 octobre 2020, 11-12 mars 2021, 29 juin-1er juillet 2022
Rapports complets des réunions : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cctf/publications
Neuf groupes de travail : https://www.bipm.org/fr/committees/cc/cctf/

- Étalons de fréquence (Groupe de travail commun au CCL et au CCTF)
- CIPM MRA
- Coordination de la mise au point de techniques avancées de comparaison de temps et de fréquence
- Comparaisons de temps à l'aide de systèmes GNSS
- Étalons primaires et secondaires de fréquence
- Stratégie
- Temps atomique international
- Algorithmes pour les échelles de temps
- Comparaisons bidirectionnelles de temps et de fréquence sur satellite

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCTF (et comparaisons supplémentaires)	1, mensuelle	En continu (+1)	En continu
Comparaisons du BIPM	0	0	0
Études pilotes du CCTF	0	0	0
CMCs	776 CMCs dans 19 catégories de service publiées dans la KCDB		

40. Présentation des projets de résolution D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC » et E « Sur la future redéfinition de la seconde »

M. Dimarcq, président du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), donne une vue d'ensemble du CCTF qui, depuis 2018, consacre son travail à quatre « sujets stratégiques ». En 2020, le CCTF a créé quatre groupes d'études afin de coordonner les travaux sur ces sujets stratégiques :

1. la mise à jour de la feuille de route concernant la redéfinition de la seconde SI ;
2. l'insertion de secondes intercalaires dans l'UTC et la recherche d'un consensus sur une échelle de temps continue ;
3. la promotion des bénéfices mutuels de l'UTC et du GNSS et la traçabilité métrologique entre l'UTC et les mesures GNSS ;
4. le partage de ressources afin d'améliorer la gestion internationale du temps.

Les deux premiers groupes se sont concentrés sur la mise au point des projets de résolution D et E, détaillés dans la suite de l'exposé ; les groupes 3 et 4 ont aussi été dynamiques. La promotion des bénéfices mutuels entre l'UTC et les systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS) ont été évoqués dans la présentation donnée par M. Benedicto. La plupart des horloges UTC sont comparées à l'aide d'un GNSS, qui dissémine à son tour l'approximation de l'UTC en collaboration avec les laboratoires qui le réalisent. Réciproquement, la synchronisation des GNSS avec l'UTC renforce l'interopérabilité entre les différents systèmes GNSS. Le CCTF a proposé et examiné des recommandations visant à reconnaître la traçabilité des mesures GNSS à l'UTC selon différentes options actuellement à l'étude. Le partage des ressources afin d'améliorer la gestion internationale du temps est illustré par le calcul de l'UTC à l'aide de près de 450 horloges atomiques réparties dans 85 laboratoires du temps de tailles très diverses à travers le monde. La capacité à surveiller et à valider les mesures réalisées dans chaque laboratoire améliore la qualité de l'UTC et la réalisation des UTC(k). Le CCTF cherche à développer de nouvelles capacités en partageant les ressources entre les laboratoires pour arriver à un haut niveau de savoir-faire dans chacun d'entre eux, ce qui permettra d'améliorer la qualité des données et, par conséquent, la qualité générale de l'UTC. Ainsi, le BIPM a récemment conclu un accord de collaboration avec l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) reconnaissant leurs objectifs communs et visant à améliorer la formation en métrologie du temps et des fréquences.

M. Dimarcq fait un résumé des perspectives du CCTF. Il rappelle que le CCTF poursuivra ses activités et développera des réflexions, études et partenariats sur les sujets suivants : les étalons primaires et secondaires, en collaboration avec le CCL ; les techniques de transfert du temps et des fréquences ; les échelles de temps ; le CIPM MRA et la traçabilité métrologique. Le CCTF continuera à soutenir les activités transversales liées aux « sujets stratégiques », ainsi que le travail nécessaire décrit dans les projets de résolution D et E. M. Dimarcq explique qu'un numéro spécial de *Metrologia* sur la métrologie du temps et des fréquences est en cours d'élaboration.

Le président remercie M. Dimarcq et demande, avant de poursuivre avec la présentation des projets de résolution D et E, s'il y a des questions sur les activités du CCTF.

M. Milton souligne les réussites significatives du CCTF pour progresser concernant les quatre sujets stratégiques : deux d'entre eux ont conduit à la rédaction de projets de résolution qui seront examinés par la CGPM. Le troisième sujet, celui de la traçabilité des échelles de temps GNSS, révolutionne discrètement la façon dont les laboratoires nationaux de métrologie envisagent la question. M. Milton ajoute que même sans les changements majeurs introduits par les projets de résolution D et E, la traçabilité des échelles de temps GNSS à elle seule aurait constitué une avancée très importante du CCTF depuis 2018. Il félicite le CCTF et salue le travail considérable effectué en coulisses pour parvenir à ces progrès.

Projet de résolution D

M. Dimarcq poursuit avec la présentation de la résolution D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC ». Il explique que les applications technologiques et numériques sur lesquelles s'appuient des infrastructures nationales critiques fonctionnent à l'aide d'une synchronisation temporelle. Les exigences essentielles vis-à-vis d'une échelle de temps commune, outre son exactitude et sa stabilité, sont avant tout les suivantes : continuité, monotonie, fiabilité et facilité d'accès. Le Temps atomique international (TAI) est calculé par le BIPM à partir de la moyenne pondérée de 450 horloges atomiques réparties dans 85 laboratoires à travers le monde. Son pilotage en fréquence est obtenu à l'aide d'une dizaine d'étalons primaires et secondaires. Depuis 1972, l'UTC est le résultat de l'addition de secondes intercalaires au TAI. Le temps universel (UT1) est défini par l'angle de rotation de la Terre, sujet à des fluctuations aléatoires. Lorsque la différence entre UT1 et UTC devient trop grande, l'ajout d'une seconde entière à l'UTC permet de s'assurer que la différence [UTC – UT1] soit toujours inférieure à une seconde. Toutefois, l'impossibilité de prédire les futures perturbations de manière précise pose problème. Les réseaux numériques réagissent très mal au fait qu'il n'est pas possible de prévoir l'insertion des secondes intercalaires, les systèmes d'exploitation des ordinateurs n'acceptant pas l'existence de minutes de soixante-et-une secondes. Le CCTF a mené une enquête en 2021 et rassemblé plus de 200 réponses : la grande majorité des utilisateurs ont demandé la fin de la discontinuité de l'UTC due à l'insertion de secondes intercalaires. L'enquête a également révélé que d'autres échelles de temps que l'UTC sont utilisées comme échelles de temps continues.

M. Dimarcq rappelle que l'UTC est l'étalon de temps international. L'UTC s'appuie sur 85 laboratoires de temps qui fournissent des données et réalisent sa traçabilité en temps réel sous l'autorité de la CGPM. Le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS) calcule et publie la différence [UT1 - UTC]. Le secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT-R) s'assure de la bonne diffusion de l'UTC. Toutefois, les utilisateurs sur lesquels s'appuient des infrastructures critiques ont besoin d'une échelle de temps unique et continue. L'UTC est de moins en moins utilisée par les systèmes GNSS, les géants du numérique (par exemple Google, Amazon, Facebook, Apple ou Alibaba) et les principaux protocoles de synchronisation et de diffusion de l'heure par internet tels que Network Time Protocol (NTP) et Precision Time Protocol (PTP).

Un certain nombre de méthodes *ad hoc* ont été mises au point pour contourner l'insertion de secondes intercalaires. Certaines consistent à ignorer les secondes intercalaires après la synchronisation initiale (c'est le cas des temps systèmes GPS, Galileo et BeiDou), à arrêter l'horloge pendant deux secondes à 23:59:59 ou 00:00:00 (dans le cas de NTP), ou à réduire la fréquence de l'horloge pendant sur un intervalle défini (c'est la solution choisie par Google, Microsoft, Facebook et Alibaba). Aucune de ces méthodes n'est conforme à l'UTC concernant le « jour » où est insérée la seconde intercalaire et la plupart se contredisent. De plus, les utilisateurs de ces différents services sont incapables de déterminer quelle méthode est employée, en particulier *a posteriori*. M. Dimarcq rappelle la menace que la seconde intercalaire en soi et les méthodes alternatives pour contourner son insertion à l'UTC font peser sur la résilience de la synchronisation, et l'urgence de réviser la procédure complète concernant l'introduction d'une seconde intercalaire à l'UTC.

La solution proposée est d'augmenter la limite de tolérance de [UT1 – UTC]. L'UTC resterait liée à l'UT1, c'est-à-dire à l'angle de rotation de la Terre, avec pour origine le méridien de référence de Greenwich. Dans la vie quotidienne, le grand public ne remarquerait aucune différence perceptible puisque l'évolution de [UT1 – UTC] resterait négligeable comparée aux variations de + ou – 15 minutes de la durée des journées pendant les saisons, et ce pour les siècles à venir. L'impression générale de conformité aux phénomènes astronomiques resterait identique. Les utilisateurs à la recherche d'informations sur la différence entre l'UTC et l'UT1 trouveraient des estimations précises en temps réel transmises par les signaux de temps de l'IERS, la NASA, le GNSS et l'UIT-R.

M. Dimarcq rappelle que dans les années 1970, l'UTC servait d'approximation de l'UT1, principalement pour la navigation à l'aide d'instruments optiques. L'approximation UTC ≈ UT1, qui entraîne une incertitude sur la position pouvant aller jusqu'à 400 m (au niveau de l'équateur), n'est utilisée que pour les applications de faible précision. Elle n'est pas adaptée aux applications de haute précision (telles que l'astronomie de haute exactitude et les opérations menées dans l'espace) ; celles-ci utilisent déjà les estimations de l'IERS et de la NASA qui, avec leur incertitude de 10 microsecondes, correspondent à une incertitude maximale de position de 3 mm.

M. Dimarcq ajoute que l'augmentation de la tolérance de [UT1 – UTC] est déjà largement acceptée. Les changements proposés reçoivent le soutien de nombreuses organisations et plusieurs réunions ont eu lieu pour examiner leurs implications techniques, légales et politiques.

M. Dimarcq résume le projet de résolution D, qui prévoit une solution en deux étapes. La première consiste à obtenir l'approbation de la CGPM pour accroître la tolérance de [UT1 – UTC] au cours de la prochaine réunion de la CGPM en 2026 et adopter une date de mise en œuvre d'ici à 2035. La seconde étape serait d'approuver lors de la 28e réunion de la CGPM la nouvelle valeur de la tolérance, qu'elle soit fixée à une minute, une heure ou une valeur infinie, et de valider une procédure de révision périodique afin de tenir compte des nouvelles découvertes et d'une meilleure compréhension des irrégularités de la rotation de la Terre. M. Dimarcq précise qu'il est ressorti des discussions que qu'une date de mise en œuvre en 2035 au plus tard représentait le meilleur compromis car les systèmes doivent être mis à jour et les questions légales résolues. En outre, une réponse doit être apportée aux problèmes importants suivants : la discontinuité de l'UTC et les différentes solutions *ad hoc* mises en œuvre génèrent de la confusion et menacent la résilience des infrastructures nationales critiques ; l'accélération actuelle du rythme de rotation de la Terre pourrait conduire à l'introduction de secondes intercalaires négatives dans la décennie à venir ; et l'une des échelles de temps GNSS pourrait être utilisée *de facto* comme étalon international.

Selon M. Dimarcq, les questions que soulève le Projet de résolution D sont complexes et sensibles. Il remercie le CCTF et du CIPM, tous les experts extérieurs, le directeur du BIPM et le Département du temps du BIPM pour leurs échanges fructueux, leur soutien et leurs contributions.

Le président remercie M. Dimarcq et ouvre la discussion.

Mme Macdonald (Canada) confirme, conformément à une déclaration écrite soumise par le Canada en amont de la réunion, que le Canada soutient le Projet de résolution D et encourage les délégués de la CGPM à faire de même. Si le projet est approuvé, Mme Macdonald exhorte la communauté du temps et des fréquences à appliquer à la lettre l'expression « d'ici 2035 au plus tard » contenue dans la résolution, afin d'accélérer la mise en œuvre de la solution technique, en gardant à l'esprit que le CCTF recommandait initialement une mise en œuvre pour 2030 au plus tard.

M. Mikiel (Pologne) déclare avoir soumis une déclaration écrite au BIPM dans laquelle la Pologne offre son soutien concernant la résolution et ne voit aucune raison de modifier le texte du projet de résolution. Il ajoute que d'après la Pologne, le rejet du projet de résolution pourrait causer de graves problèmes, en particulier pour les entreprises informatiques ou d'autres secteurs essentiels. De plus, la Pologne pense que le texte soumis par la délégation russe préalablement à la réunion pose un sérieux problème car il prévoit une période de transition vers un UTC continu qui n'interviendrait pas avant 2040 sans en préciser la date de fin qui pourrait être 2040 comme 2050. Il appuie le fait que la Pologne apporte son soutien total à la résolution soumise par le BIPM et espère la voir adoptée par la Conférence générale.

M. Thompson (Royaume-Uni) remercie M. Dimarcq pour ses explications très claires sur l'importance du Projet de résolution D et M. Benedicto, de l'ESA, pour sa présentation tout aussi excellente qui a souligné la gravité du sujet. M. Thompson souligne que la mise en œuvre de différentes méthodes non coordonnées menace la résilience des capacités de synchronisation sur lesquelles s'appuient des

infrastructures nationales critiques. La continuité de l'UTC pour le siècle à venir et la mise en place d'une échelle de temps internationale résiliente sont des enjeux capitaux. M. Thompson cite M. Salomon qui remarquait plus tôt que la procédure concernant la seconde intercalaire est un désastre. Il approuve personnellement la décision du gouvernement du Royaume-Uni de voter en faveur de l'adoption du Projet de résolution D.

M. De Angelis (Italie) fait un commentaire personnel en tant que physicien des particules et astrophysicien : la seconde intercalaire sème la discorde, en particulier dans les observatoires. Il décrit la seconde intercalaire comme un vrai cauchemar car il est nécessaire de s'assurer de la synchronisation de tous les télescopes et de surveiller l'activité des satellites. Pour toutes ces raisons, l'Italie soutient fermement le projet de résolution D.

M. de Waal (Pays-Bas) déclare que les Pays-Bas soutiennent le Projet de résolution D et, comme le Canada, sont favorables au calendrier suggéré dans la proposition.

Mme Chambon (France) souligne que M. Benedicto a très bien résumé les risques et insiste sur leur niveau élevé. Comme mentionné par M. Dimarcq et M. Benedicto, la menace dans le futur d'une seconde intercalaire négative plane et nul ne peut prédire quelles en seraient les conséquences. Mme Chambon soutient la proposition du Canada de ne pas repousser la date de mise en œuvre au-delà de 2030 en raison de l'urgence du travail à accomplir. La France apporte son soutien au travail effectué par le CCTF.

Mme Goldovsky (Israël) souligne le travail scientifique conséquent pour préparer et rédiger le Projet de résolution D. De nombreuses réunions ont eu lieu en ligne afin d'examiner le problème de l'amélioration et du développement de l'échelle de temps internationale UTC en tant qu'étalon de temps unique, continu, aisément et universellement accessible, capable de répondre aux besoins de domaines aussi variés que l'industrie, la science, la finance, le numérique et les infrastructures nationales critiques. Le National Physical Laboratory of Israel a participé aux échanges. L'échelle de temps international UTC est utilisée par tous les laboratoires nationaux de métrologie et d'autres disciplines comme seul étalon international permettant de synchroniser les échelles de temps locales, qui servent ensuite à synchroniser toutes les infrastructures nationales critiques. Les nombreuses années d'expérience acquises dans l'ajout de « secondes intercalaires » à l'échelle de temps UTC ont montré les limites de cette méthode. Les secondes intercalaires brisent la continuité de l'échelle et nombre de systèmes numériques n'intègrent pas correctement ces secondes. La mise en place de corrections impropres et non conformes à l'UTC dans des systèmes numériques peut conduire à une défaillance des infrastructures nationales critiques. Or, l'emploi de telles corrections est de plus en plus fréquent en dépit de leur incompatibilité entre elles et avec l'UTC. L'utilisation de ces corrections *ad hoc* entraîne un risque de panne de ces infrastructures cruciales, en plus de menacer l'emploi de l'UTC pour de nombreuses applications modernes, y compris celles au cœur de la transformation numérique de la finance et des télécommunications, de la distribution de l'énergie et de la navigation. De plus, il est toujours impossible de prédire la vitesse de la rotation de la Terre avec une précision suffisante. Les dernières observations de la rotation de la Terre montrent une accélération sur les deux dernières années, ce qui pourrait conduire au retranchement d'une seconde intercalaire, scénario qui ne s'est jamais présenté auparavant. La délégation israélienne soutient pleinement le scénario d'amélioration de l'UTC qui consiste à augmenter la tolérance de la différence UT1 – UTC jusqu'à une valeur fixe qui pourra être révisée à l'avenir. La délégation d'Israël propose d'adopter le Projet de résolution D.

La délégation des États-Unis apporte son soutien à la résolution ainsi qu'à la proposition formulée par le Canada d'accélérer la transition vers ce nouveau système.

Projet de résolution E

M. Dimarcq présente le Projet de résolution E « Sur la future redéfinition de la seconde ». Il rappelle que six des sept unités du Système international sont définies à partir de la seconde, à l'exception de la mole. La définition de la seconde a quitté le domaine de l'astronomie en 1967 pour rejoindre celui de la physique quantique. Elle était alors définie comme « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Cette définition a été à nouveau révisée au cours de la 26e réunion de la CGPM (2018) : « La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{Cs}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1}. »

M. Dimarcq se réfère à la présentation de M. Salomon, qui a montré que la réalisation de la seconde du SI à l'aide d'étalons primaires de fréquence n'a fait que s'améliorer au fil des décennies. Depuis 2010, les meilleures incertitudes relatives sur la fréquence de la fontaine à atomes de césium sont de l'ordre de 10^{-16}. La métrologie du temps entre désormais dans l'ère de la métrologie optique des fréquences, avec des étalons atteignant des niveaux d'incertitude inférieurs de deux ordres de grandeur à ceux des étalons au césium.

La nouvelle définition de la seconde vise à permettre, à court terme, une amélioration d'au moins un à deux ordres de grandeur de la réalisation de la seconde (afin d'atteindre une exactitude relative de fréquence de quelques 10^{-17} à 10^{-18}) et, à long terme, des améliorations encore plus importantes. La continuité avec la définition actuelle sera essentielle afin d'assurer une continuité et une stabilité de la mise à disposition de la nouvelle seconde du SI à l'aide du TAI. Il faudra également une amélioration sensible de la qualité du TAI dès le changement de définition, ou *a minima* aucune dégradation. La nouvelle définition devra permettre la dissémination de l'unité à une gamme très vaste d'usagers et elle devra être acceptable pour tous les laboratoires nationaux de métrologie et toutes les parties prenantes.

M. Dimarcq souligne que le CCTF a mis à jour la feuille de route sur la redéfinition de la seconde du SI. Ce travail a été mené par une équipe dédiée du CCTF de 40 personnes réparties dans quatre groupes de travail. Une analyse SWOT (forces, faiblesses, opportunités et menaces) des différentes options envisagées pour la redéfinition a été entreprise. Les options sont les suivantes : option 1, une transition atomique ; option 2, un ensemble de transitions atomiques ; option 3, fixer la valeur d'une constante fondamentale. M. Dimarcq explique que l'option 3 est irréalisable actuellement. Il s'agit toutefois d'une option idéale qui rendrait le SI totalement cohérent puisque toutes les définitions reposeraient sur des constantes fondamentales. L'équipe dédiée a défini un ensemble de critères et conditions pour pouvoir redéfinir la seconde ainsi que des indicateurs pour évaluer le degré de progression. De plus, l'équipe a examiné plusieurs scénarios de calendrier concernant la redéfinition de la seconde. M. Dimarcq donne un aperçu des critères et conditions de changement de la définition de la seconde et présente un diagramme indiquant le degré de progression en 2022 pour chacun des critères obligatoires.

M. Dimarcq expose différents scénarios pour la redéfinition de la seconde. Une redéfinition lors de la 28e réunion de la CGPM (2026) n'est pas réaliste puisque l'option à privilégier ne fait pas consensus et que de nombreux travaux restent à effectuer pour satisfaire tous les critères obligatoires. La 28e réunion pourrait être l'occasion de valider une feuille de route vers une redéfinition en 2030 si, en 2026, un consensus est trouvé concernant l'option à retenir et si le travail à effectuer pour satisfaire tous les critères semble pouvoir être achevé avant 2030. Si une redéfinition est impossible en 2030, elle devra être reportée à la réunion de la CGPM de 2034, voire de 2038. Toutefois, ce calendrier exigerait la maintenance jusqu'à la fin des années 2030 des étalons primaires de fréquence reposant sur des fontaines à césium, construits dans les années 1990 et 2000. Les laboratoires nationaux de métrologie seraient

contraints de poursuivre l'exploitation de ces systèmes complexes afin de garantir la mise en pratique de la définition actuelle de la seconde.

M. Dimarcq conclut qu'afin de garantir la continuité entre les définitions actuelle et future, le Projet de résolution E encourage le CIPM à souligner l'importance d'atteindre les objectifs fixés dans la feuille de route pour la redéfinition de la seconde et à présenter des propositions concernant la transition privilégiée, ou les transitions, pour une redéfinition de la seconde dès la 28e réunion de la CGPM. Il exhorte également le CIPM à présenter, la 28e réunion de la CGPM, les mesures qui devront être prises pour permettre l'adoption de la nouvelle définition au cours de la 29e réunion de la CGPM, en 2030. Le projet de résolution invite les États Membres à soutenir les activités de recherche et le développement d'infrastructures nationales et internationales pour permettre des avancées vers l'adoption d'une nouvelle définition pour la seconde. Ce dernier point vaut particulièrement pour les infrastructures utilisant la fibre optique car cette technologie affiche aujourd'hui une incertitude de l'ordre de 10^{-18}.

41. Rapport de l'OTICE sur les activités de liaison

M. Doury, ingénieur en imagerie sismique acoustique pour la Commission Préparatoire de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE), présente les avancées importantes réalisées par l'organisation. L'Article 1 du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires prévoit que : « *Chaque État partie s'engage à ne pas effectuer d'explosion expérimentale d'arme nucléaire ou d'autre explosion nucléaire et à interdire et empêcher toute explosion de cette nature en tout lieu placé sous sa juridiction ou son contrôle.* » M. Doury ajoute que plus de 2 000 essais ont eu lieu depuis 1945, contre 12 depuis l'ouverture à la signature du traité le 24 septembre 1996. De plus, seul un pays n'a pas respecté le moratoire sur les essais nucléaires depuis 2000. La Commission préparatoire de l'OTICE est chargée de mettre en place un régime de vérification et de promouvoir l'universalité du Traité.

M. Doury explique qu'un régime de vérification est nécessaire pour surveiller le respect du traité par les États membres lorsque celui-ci sera entré en vigueur. Le système de vérification repose sur quatre composantes. La première, le Système de surveillance international (International Monitoring System, IMS), permet de récolter, d'analyser et de diffuser les données issues de 337 stations de surveillance. L'IMS combine quatre technologies de surveillance : l'imagerie sismique, utilisée dans 170 stations pour détecter les explosions nucléaires souterraines ; les stations hydroacoustiques, au nombre de onze, pour surveiller l'activité sous-marine ; soixante stations infrasons pour déceler les changements dans l'air ; quatre-vingts stations d'analyse des radionucléides pour déterminer la nature nucléaire ou non des explosions. Neuf stations de l'IMS sur dix sont déjà certifiées et opérationnelles. Si le réseau a démontré son efficacité, il ne sert pas seulement à détecter les essais nucléaires mais est également employé à des fins civiles, notamment pour sauver des vies et contribuer à la recherche scientifique. Par exemple, les données de l'IMS alimentent les systèmes d'alerte aux tsunamis et permettent de repérer les émissions radioactives au cours d'accidents nucléaires, comme ce fut le cas pendant l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi au Japon en 2011. Les États membres et les chercheurs, notamment ceux travaillant sur le changement climatique, peuvent accéder librement aux données de l'IMS.

M. Doury explique que la métrologie est nécessaire pour mettre en place un contrôle qualité des systèmes de mesure de l'IMS. L'OTICE exploite les quatre outils technologiques exposés ci-dessus, dont l'action conjointe permet de récolter des preuves scientifiques légales en cas d'essai nucléaire. La crédibilité des données et des systèmes de mesure de l'OTICE est absolument primordiale. Parvenir à cette crédibilité

technique et scientifique exige de la transparence, des études comparatives, une évaluation par les pairs, ainsi qu'un système de contrôle qualité strict, opérationnel pendant toute la durée de vie des équipements de mesure de l'OTICE et assuré pendant plusieurs décennies sur les stations.

Afin d'atteindre ce niveau de crédibilité, l'OTICE s'est fixé des objectifs ambitieux : d'abord, celui de démontrer le contrôle strict de la qualité de ses mesures pour assurer la fiabilité et la crédibilité des données de l'IMS ; ensuite, garantir la cohérence et l'équivalence des données de mesure produites par l'ensemble du réseau ; enfin, veiller au respect et à la transparence des bonnes pratiques en dépit des changements d'équipements, de prestataires ou de personnel. M. Doury rend compte de la situation actuelle concernant le contrôle qualité pour les quatre technologies : la détection des radionucléides obéit déjà à des normes très strictes et des processus tels que des essais d'aptitude sont en place. Par ailleurs des CMCs sont parfaitement adaptées à la détection des émissions de particules et de gaz rares. L'enjeu principal pour l'OTICE réside dans les technologies sismique, hydroacoustique et infrason : il est nécessaire de disposer de CMCs validées pour l'ensemble de la gamme de mesures effectuées par l'IMS. L'emplacement des systèmes de mesure de l'OTICE, souvent dans des environnements reculés et hostiles, représente une difficulté supplémentaire : leur étalonnage ne peut pas s'effectuer en laboratoire. La traçabilité est requise sur toute la chaîne de mesure jusqu'aux stations, ce qui a conduit l'OTICE à se rapprocher du domaine de la métrologie et à collaborer avec le BIPM.

Le BIPM a invité l'OTICE à donner une présentation lors d'une réunion du Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV) pour la première fois en 2017, date depuis laquelle l'organisation participe aux réunions biannuelles du CCAUV. En 2018, l'OTICE a été invitée à donner une présentation lors de la 26e réunion de la CGPM et a ainsi exposé les besoins de l'IMS. À la suite de la 26e réunion de la CGPM, le BIPM et l'OTICE se sont accordés sur des objectifs communs qui constituent les fondements d'une relation mutuellement avantageuse. Les exigences de traçabilité de l'OTICE ont fait l'objet d'un document d'orientation stratégique rédigé par le CCAUV et le CCRI. En juin 2021, la collaboration existante a été formalisée par la signature d'un accord pratique de collaboration entre le BIPM et l'OTICE concernant la traçabilité métrologique des mesures de l'activité sismique, infrason et de la radioactivité, accord qui a noué des relations officielles entre le CCAUV, le CCRI et l'OTICE.

Selon M. Doury, l'enjeu suivant sera de faire émerger de véritables projets de travail du document de stratégie rédigé par les comités consultatifs. La communauté de la métrologie doit relever le défi de déterminer les besoins en termes d'acoustique, d'ultrasons et de vibrations dans les basses fréquences. Le projet de recherche InfraAUV 2020-2023, mené par l'European Association of National Metrology Institutes (EURAMET), tient compte des besoins exprimés par l'OTICE. Le projet compte dix participants et comprend à la fois des laboratoires nationaux de métrologie et des prestataires de l'IMS, ce qui permet une mise en œuvre très rapide des avancées réalisées. Le projet vise à étendre aux basses fréquences la gamme des mesures traçables de l'environnement réalisées dans les domaines infrason, sous-marins et sismiques. Ce travail passe par le développement de méthodes d'étalonnage, de procédures de validation et de dissémination, puis par leur transfert sur site et leur application concrète dans les stations de mesure. Le troisième objectif est un défi, celui de garantir la traçabilité métrologique jusque dans les stations. Ce projet a exigé une collaboration étroite entre l'OTICE, les experts en acoustique sismique et le CCAUV.

M. Doury observe qu'en 2018, il n'existait pas de CMCs validées pour une grande partie de la gamme des infrasons à surveiller, qui s'étend de 0,02 hertz à 4 hertz. Le projet InfraAUV 20220-2023 vise à répondre à ce besoin et se concentre en particulier sur l'utilisation de nouveaux instruments. Auparavant, l'acoustique s'attachait à mesurer la pression statique à l'aide de baromètres et les sons audibles ou variations de pression de basse fréquence à l'aide de microphones. On s'intéresse désormais à l'emploi de micro-baromètres pour couvrir la gamme des infrasons surveillée par l'IMS, qui se situe entre la pression statique et les sons audibles. Les micro-baromètres diffèrent des microphones et nécessitent de nouvelles méthodes

d'étalonnage pour servir d'étalons de transfert. Ces méthodes d'étalonnage sont en cours de développement et suivent différents principes. Plusieurs comparaisons déjà organisées au sein du projet montrent une équivalence satisfaisante des différents principes employés pour mettre l'étalonnage au point. Des CMCs pourraient ainsi être disponibles rapidement et combler l'absence d'aptitudes déclarées dans la gamme concernée. Assurer la traçabilité sur site est également à l'étude. L'OTICE collabore de façon étroite à ce sujet avec le projet InfraAUV, en développant les logiciels nécessaires pour étalonner l'ensemble de la chaîne de mesures jusqu'aux stations. Depuis 2018, des avancées dans le développement de deux nouvelles normes IEC ont été réalisées. L'une d'elles, portant sur l'étalonnage primaire des microphones par réciprocité, a été révisée pour couvrir les basses fréquences de la gamme des infrasons surveillés par l'IMS. La seconde norme créée autorise l'emploi de méthodes d'étalonnage alternatives non-fondées sur la réciprocité, plus adaptées aux infrasons. Elle permet l'intégration de nouvelles méthodes pour faciliter l'étalonnage des micro-baromètres. M. Doury espère que les premières CMCs, en cours de préparation, seront soumises au BIPM dans un futur proche.

M. Doury indique que le fruit de la collaboration entre le BIPM et l'OTICE ne réside pas seulement dans la création de CMCs et dans les progrès réalisés par la communauté de la métrologie mais également dans tout ce que l'OTICE et la communauté d'organisations qui travaillent avec elle peuvent apprendre de la communauté de la métrologie. Il rappelle les nombreux progrès accomplis avec les prestataires de l'IMS afin que ces derniers aient une meilleure compréhension des concepts métrologiques tels ceux du Vocabulaire International de Métrologie (VIM) et du Guide pour l'expression d'incertitude de mesure (GUM). Cette meilleure compréhension a conduit, en 2021, à la première comparaison organisée par l'OTICE dans la gamme infrason surveillée par l'IMS, comprenant cinq participants et pilotée par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE, France). En sa qualité de laboratoire national de métrologie, le LNE a fourni de nombreuses méthodes nécessaires à la comparaison qui avait pour mesurande l'efficacité en pression entre 0,01 et 10 Hz, soit au-delà de la gamme d'infrasons surveillée par l'IMS. La comparaison impliquait trois types de capteurs : les baromètres, les micro-baromètres, et les microphones ; elle a permis pour la première fois d'évaluer formellement l'aptitude des prestataires de services de l'IMS. Le projet de rapport A indique que l'équivalence est démontrée pour la majorité de la gamme de fréquences. L'OTICE envisage désormais des comparaisons de ses technologies sismiques.

M. Doury observe qu'une partie de la gamme des fréquences sismiques surveillées par l'IMS ne fait pas l'objet de CMCs validées. Le projet InfraAUV se penche actuellement sur le problème. L'imagerie sismique fait face à un défi majeur : les établis qui équipent actuellement les laboratoires nationaux de métrologie ont été construits pour étalonner des accéléromètres, qui sont des instruments légers, et il sera nécessaire d'effectuer des adaptations importantes pour qu'ils puissent accueillir des instruments sismiques. De plus, le projet InfraAUV, les laboratoires nationaux de métrologie et les prestataires de l'IMS mettent au point des méthodes pour garantir la traçabilité jusqu'aux capteurs sismiques une fois déployés sur site.

Il n'existe actuellement aucune CMC validée concernant la gamme de fréquences hydroacoustiques surveillée par l'IMS. De nombreuses avancées ont cependant été réalisées avec le développement des premières méthodes d'étalonnage portant sur l'intégralité de la gamme surveillée par l'IMS. L'étalonnage sur site des outils hydroacoustiques représente une difficulté majeure : en effet, les stations sont équipées de microphones installés à environ un kilomètre sous la surface de l'océan dans le canal SOFAR (Sound Fixing and Ranging). Les recherches dans ce domaine se poursuivent, l'OTICE, le CCAUV et le projet InfraAUV collaborant de façon étroite.

M. Doury résume ce qu'il est possible d'envisager pour l'avenir et ce que l'on peut attendre de la collaboration de l'OTICE avec le BIPM. Les avancées réalisées et les connaissances acquises au contact de la communauté de la métrologie devront être diffusées à l'ensemble de l'OTICE, tout au long de la chaîne de mesures jusqu'aux opérateurs manipulant les instruments de mesure, responsables

de l'étalonnage des stations. L'OTICE poursuivra sa collaboration avec les prestataires de l'IMS pour répondre à l'exigence de traçabilité jusqu'aux stations. L'enjeu est de taille pour rendre ce processus opérationnel, l'objectif étant de disposer de résultats de mesure précisant les incertitudes associées. De plus, toutes les données de mesure doivent être traitées et documentées afin de garantir leur reproductibilité. La transformation numérique doit être prise en considération pour relever ce défi et il sera nécessaire de définir des formats pour fournir les résultats, permettre leur reproductibilité et décrire la façon dont les données seront diffusées. Le développement de capteurs déployés dans des environnements très hostiles tout au long de leur durée de vie représente un défi supplémentaire. Le relever nécessite d'étudier le comportement des capteurs pendant leur fonctionnement et l'impact de l'environnement sur les caractéristiques des capteurs.

Pour conclure, assurer la traçabilité métrologique des mesures de l'OTICE joue un rôle clé pour garantir la confiance et la crédibilité accordées aux données de l'IMS sur le long terme. L'OTICE a fait part de ses besoins et a reçu une réponse concrète de la communauté de la métrologie. Le BIPM et l'OTICE poursuivent des objectifs communs concrets dans un cadre officiel, l'arrangement pratique : la collaboration se montre déjà bénéfique pour les deux parties. La communauté de la métrologie travaille à étendre ses aptitudes de mesure et d'étalonnage vers les basses fréquences. D'après M. Doury, au rythme de progression actuel, on peut s'attendre à voir la plupart des exigences concernant les technologies sismiques et acoustiques satisfaites dans la décennie à venir.

Le président remercie M. Doury et demande s'il y a des remarques.

M. Milton ajoute que la communauté internationale souhaite disposer de mesures de niveaux très faibles de radioactivité et que les laboratoires nationaux de métrologie pourraient fournir ces mesures à l'aide d'étalons adéquats dans le futur. Le CCRI pourrait en tenir compte dans sa stratégie et dans sa feuille de route.

42. Rapport du président du CCAUV

M. Héctor Laiz, président du Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV), présente son rapport sur les activités du CCAUV depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCAUV

Le CCAUV couvre les grandeurs dans les domaines de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations, qui tous sont concernés par des ondes mécaniques dans différents supports (air, eau et solides) et dans différentes structures (composants de machine, véhicules, bâtiments, et même tissus et corps humains). Bien que les unités de mesure utilisées dans les domaines du CCAUV ne soient pas des unités fondamentales du Système international d'unités (SI), elles ont un lien direct avec la santé et la sécurité publiques car leurs applications ont un impact sur la vie quotidienne. Le processus de planification stratégique suivi par le CCAUV a permis de dégager des axes clairs concernant ses futures activités et a mis en lumière l'importance et le caractère prioritaire que revêtent les domaines de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations pour les parties prenantes du CCAUV.

Domaine de compétence du CCAUV

La mission du CCAUV est de conseiller le CIPM sur tous les sujets et questions scientifiques qui entraînent des répercussions sur la métrologie dans le domaine des ondes mécaniques : l'acoustique (A), les ultrasons et l'acoustique dans l'eau (U) et les vibrations (V). Le CCAUV identifie et organise les comparaisons clés requises dans ces quatre domaines pour établir la comparabilité mondiale des

mesures et leur traçabilité au SI. Par ailleurs, le CCAUV sert de référence et de réseau à la communauté diversifiée de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau lorsqu'il s'agit de discuter des résultats des derniers travaux de recherche sur des domaines émergents et lorsqu'il s'agit de fixer des objectifs communs et d'établir des collaborations entre les laboratoires nationaux et désignés des États Membres ou avec d'autres organismes pertinents.

Stratégie

En 2021, le CCAUV a révisé sa stratégie afin de définir les besoins métrologiques actuels et à venir pour les applications de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations. Étant donné que le BIPM ne mène aucune activité dans ces domaines, la planification ne concerne que les laboratoires nationaux de métrologie, les laboratoires désignés, et leurs parties prenantes. Le document de stratégie publié par le CCAUV présente une étude détaillée de chacune de ses disciplines.

Le CCAUV a désormais atteint le niveau où il conduit des répétitions de comparaisons clés en même temps qu'il en envisage de nouvelles. Les comparaisons dans les domaines de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau sont parvenues à maturité et les répétitions de comparaisons prévalent désormais. En outre, ces comparaisons clés répétées sont caractérisées par un champ d'application élargi qui couvre des domaines de fréquences plus vastes et qui prend en considération les demandes en constante évolution des utilisateurs.

Afin de pouvoir offrir un travail de la plus haute qualité et efficacité, le CCAUV est assisté par ses trois groupes de travail. Le Groupe de travail sur la stratégie supervise de façon régulière la révision de la stratégie du CCAUV et des documents associés, et suit le développement et l'évolution des domaines scientifiques pertinents. Le Groupe de travail sur la coordination des organisations régionales de métrologie est chargé, entre autres, de remédier aux obstacles concernant l'examen interrégional des aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) et d'harmoniser les processus d'examen régionaux des CMCs. Le Groupe de travail sur les comparaisons clés examine les protocoles et rapports de comparaisons clés internationales et coordonne les comparaisons clés avec les organisations régionales de métrologie afin d'assurer la qualité des données publiées.

Le CCAUV suit les développements de domaines et applications connexes, tels que le travail sur la nouvelle définition du kelvin et la métrologie des matériaux sous l'angle de la propagation des ondes acoustiques. Il maintient des relations étroites avec les comités techniques de l'International Electrotechnical Commission (IEC) et de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), deux organisations ayant le statut d'organisme de liaison au sein du CCAUV. La signature d'un accord pratique de collaboration entre le BIPM et la Commission préparatoire de l'Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) fait de cette dernière un organisme de liaison du CCAUV concernant la traçabilité des infrasons et des vibrations à basse fréquence pour le Système de surveillance international (IMS) de l'OTICE.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Le CCAUV s'est réuni deux fois depuis la 26e réunion de la CGPM (2018). Les présidents des comités techniques concernés des organisations régionales de métrologie ont été invités à assister aux réunions du CCAUV et à participer aux réunions des groupes de travail sur la stratégie et les comparaisons clés.

Le Groupe de travail sur les comparaisons clés produit des documents d'orientation sur la façon d'effectuer des comparaisons clés dans le cadre du CCAUV.

La coopération avec l'OTICE a été renforcée, une séance de la réunion plénière du CCAUV lui ayant été consacrée. Les experts du CCAUV participent aux réunions techniques de l'OTICE.

Suite à la collaboration étroite entre le CCAUV et le comité technique ISO/TC12 (ainsi qu'avec le comité technique IEC TC25) dans le cadre de la révision de la série de normes ISO 80000 entre 2018 et 2019, les liens entre le CCAUV et le groupe conjoint ISO/TC 12 et IEC TC 25 ont été formalisés.

Principales activités et réalisations

Le CCAUV se réunit tous les deux ans. Les métrologistes dans le domaine de l'acoustique, des ultrasons, des vibrations et de l'acoustique dans l'eau représentent une communauté diversifiée et géographiquement disséminée. Ainsi, les réunions du CCAUV ne concernent pas seulement la collaboration en matière de comparaisons mais elles constituent aussi un forum mondial où les participants peuvent décrire leurs travaux de recherche les plus récents et rendre compte des progrès effectués dans des domaines pertinents ; ces réunions permettent de créer et maintenir des contacts avec d'autres experts et facilitent les discussions sur les questions en cours. Les réunions donnent également l'occasion d'avoir des échanges scientifiques et de faire des présentations thématiques sur les sujets métrologiques actuels de pointe pour le CCAUV.

Le processus de planification des comparaisons clés nécessite une réflexion approfondie afin d'optimiser les ressources nécessaire pour répondre aux besoins des parties prenantes.

Certaines comparaisons clés matures ont atteint un niveau où leur répétition, généralement conduite après un cycle de 10 ans, permet d'évaluer ces comparaisons mais aussi d'étendre leur plage d'étalonnage. Le document de stratégie a permis de définir le calendrier et les périodes de répétition sur le long terme. Le CCAUV a mis en œuvre l'approche visant à limiter la participation aux comparaisons clés du CCAUV qui ont recours à des étalons voyageurs de façon séquentielle. En général, 10 à 15 laboratoires participants (2 à 3 par organisation régionale de métrologie) participent aux comparaisons clés du CCAUV pour une période d'un an.

Le National Scientific Centre "Institute of Metrology" (Ukraine) est devenu observateur du CCAUV en 2022.

Défis et difficultés

Contrairement à de nombreux autres Comités consultatifs, le CCAUV ne gère pas d'unité de base du SI mais utilise des unités dérivées (composées de plusieurs unités de base) ou l'unité sans dimension, le décibel. Ainsi, il est nécessaire dans les domaines du CCAUV de fournir des mesures traçables pour une large gamme d'unités.

La redéfinition de quatre unités de base du SI n'a pas d'impact immédiat sur la métrologie de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations mais permettra de répondre aux exigences à venir en matière d'amélioration de l'exactitude. Un système métrique cohérent concernant les grandeurs mécaniques et électromagnétiques est indispensable pour améliorer les capteurs inertiels qui sont fondés sur des étalonnages des capteurs à microsystèmes électromécaniques.

Les comparaisons menées pour établir la traçabilité sont effectuées en faisant circuler entre les participants des étalons voyageurs, tels que des microphones, des hydrophones ou des accéléromètres. Cette façon de procéder qui est inévitable dans les domaines de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations est souvent chronophage, puisqu'un participant doit attendre que le précédent ait terminé sa comparaison, et que la conservation de la qualité des artéfacts affecte de façon critique les résultats de la comparaison globale. Malheureusement, des problèmes de transport ont régulièrement lieu et ils sont souvent exacerbés par les procédures de douane nationales, ce qui peut compromettre l'état des instruments fragiles et sensibles impliqués dans la comparaison.

Perspectives à court terme et à long terme

Surveillance de l'environnement

Les futures évolutions dans le domaine de la métrologie du son dans l'air peuvent être groupées sous quatre catégories principales en matière de technologies émergentes :

a) infrastructure métrologique, capteurs et instruments ;
b) évaluation et conservation de l'audition ;
c) bruits émis par des produits et des machines ;
d) évaluation du bruit environnemental.

Le dénominateur commun à ces quatre catégories est l'objectif de mieux comprendre et de réduire l'impact du bruit sur l'homme et son environnement.

Chaque domaine de développement a un impact significatif sur la population humaine, les activités industrielles, le design industriel, l'urbanisme, la santé et la sécurité, ainsi que la protection de l'environnement. Il existe différentes situations où les applications positives du son et les stratégies de réduction du bruit sont étroitement liées. Les bénéfices de la surveillance de l'environnement s'étendent à tous les domaines de la société, des populations urbaines à celles rurales.

Un autre aspect à considérer est la surveillance des événements hautement dynamiques, tels que l'activité sismique, et des explosions contrôlées, telles que l'exploitation minière et la démolition de structures construites par l'homme. De tels événements ont un impact sur l'environnement et, dans certains cas, ces sources de bruit peuvent être d'importance vitale pour la sécurité globale. Dans ce contexte, un sous-ensemble d'activités de surveillance de l'environnement, qui ont des applications permettant de soutenir la surveillance des traités internationaux d'interdiction des essais nucléaires, nécessite d'établir la traçabilité acoustique à de très basses fréquences.

Les techniques d'acoustique dans l'eau sont des méthodes de choix pour la plupart des applications maritimes qui ont recours à l'imagerie et la communication à distance, ainsi que la cartographie en mer. Les techniques fondées sur des ondes électromagnétiques ne sont pas adaptées à ces applications car elles sont limitées en raison du haut niveau d'absorption dans l'eau.

Un autre facteur clé de la surveillance de l'environnement est le problème de l'exposition de la vie marine à la pollution sonore. L'impact du bruit acoustique émanant des activités humaines présente des risques sans précédent pour la durabilité d'espèces marines fondamentales, pour la biodiversité, pour les écosystèmes et pour la santé générale des océans. Du fait de ce problème croissant, des réglementations exigeant des mesures du bruit traçables ont été mises en place.

Des études sur le changement climatique effectuées dans l'océan ont recours à l'acoustique comme outil de sondage, par exemple pour suivre des changements de la température ou de l'acidification des eaux et pour détecter des suintements de méthane ou des fuites de CO_2 de sites de capture et de stockage du carbone situés dans les fonds marins.

Médecine et diagnostic

Les applications médicales et diagnostiques concernent tous les âges de la vie, de la naissance (dépistage néonatal) à la vieillesse (conservation de l'audition).

Toute perte d'audition peut entraîner une dégradation importante de la qualité de vie, en provoquant un isolement social, des tensions familiales ou des problèmes professionnels pour les adultes. Chez les enfants, un trouble de l'audition peut affecter la capacité de communication, l'alphabétisation, la réussite scolaire, ainsi que le développement social et psychologique. C'est pourquoi des

programmes de santé nationaux investissent massivement dans le diagnostic (en mettant en place des programmes de dépistage) et la rééducation (à l'aide d'appareils auditifs).

Le soutien apporté par la métrologie à l'audiologie objective est un prérequis fondamental à l'utilisation étendue de cette technologie, qui a le potentiel pour devenir la technologie de diagnostic standard dans le futur. Afin d'améliorer les méthodes visant à déterminer des valeurs de référence pour l'oreille et fixer les seuils auditifs, il est nécessaire d'élaborer de nouvelles méthodes d'étalonnage traçables aux étalons nationaux et d'étudier la relation par rapport aux seuils auditifs comportementaux, qui doivent être définis pour de nouveaux écouteurs.

En matière de thérapie et diagnostic, les ultrasons sont la seconde technique d'imagerie la plus couramment utilisée en médecine après les rayons x. On compte dans le monde entier 250 000 instruments de diagnostic à ultrasons et 250 millions d'examens effectués chaque année. Dans les pays développés, la plupart des fœtus seront soumis à deux examens obstétriques au minimum au cours d'une grossesse normale. Les applications de diagnostic où la sécurité est une question sensible seront un moteur pour continuer à développer des outils métrologiques et des modèles de prédiction améliorés. Un certain nombre de ces applications impliquent de générer des sorties acoustiques plus importantes.

De nouvelles applications thérapeutiques des ultrasons continueront à faire leur apparition, permettant de mettre en œuvre les concepts d'administration de médicaments fondés sur les ultrasons de haute intensité ou sur la cavitation, ainsi que sur une utilisation plus extensive de techniques d'ultrasons focalisés de haute intensité ou d'ultrasons thérapeutiques de haute intensité. L'exploitation du potentiel clinique de ces méthodes requiert le développement de la métrologie, à la fois pour les grandeurs existantes et pour celles qui émergent. Afin de libérer le potentiel des ultrasons thérapeutiques et mieux évaluer la sécurité des applications de diagnostic, la métrologie joue un rôle essentiel dans le développement et la validation des méthodes servant à déterminer la dose d'ultrasons requise.

Les facteurs clés de l'évaluation de la sécurité des applications médicales des ultrasons reposent sur des méthodes d'estimation *in vivo* des niveaux ultrasonores et de ses implications en termes de bioeffets. Les mesures dans ce domaine vont certainement avoir de plus en plus d'applications, notamment en ce qui concerne l'évaluation des solutions de protéines ou celle des nanoparticules.

Ingénierie et production

Toutes les mesures acoustiques, depuis la réalisation et la dissémination de l'étalon primaire jusqu'à l'évaluation de l'audition, les mesures du bruit ou la description de la qualité sonore reposent sur les capteurs, ainsi que sur les instruments utilisés pour produire des résultats probants. Dans de nombreux cas, l'innovation en matière de capteurs et instruments peut constituer un moteur du développement de l'instrumentation acoustique. Ainsi, le potentiel d'exploitation des synergies en partenariat avec le secteur des produits de consommation est immense : en effet, la demande en microphones dépasse désormais deux milliards d'unités chaque année. Du fait de la prolifération des capteurs peu onéreux, il est désormais possible de gérer activement les performances acoustiques de produits sophistiqués et d'opérations sans fil, intelligentes et autonomes. Par exemple, le contrôle de l'état de machines, de véhicules, d'infrastructures ferroviaires et même d'appareils domestiques pourrait être mis en place afin de maintenir les performances acoustiques inhérentes aux produits, en optimisant leur efficacité opérationnelle ou simplement en surveillant le niveau de bruit produit. Ces applications requièrent de nouvelles techniques métrologiques telles que l'auto-étalonnage à distance de capteurs et de réseaux de capteurs, la reconnaissance acoustique de signature et la prise de décision fondée sur des paramètres multiples.

Les applications des ultrasons dans l'industrie sont extensives : ils y sont couramment utilisés comme un moyen d'apporter des changements macroscopiques dans les matériaux, que ce soit en plein cœur des matériaux ou à leur surface. Le nettoyage par ultrasons est l'application la plus répandue dans

l'industrie, notamment pour les instruments chirurgicaux et dentaires. Il est nécessaire de développer des méthodes de mesure à large bande permettant de corriger les non-uniformités spatiales des distributions de champ acoustique et de contribuer à mieux en comprendre les facteurs d'influence. Cela permettra de mettre en place d'autres applications des ultrasons de haute puissance de façon économiquement viable pour une large gamme de secteurs techniques de l'industrie tels que l'alimentation (contrôle de la cristallisation, pasteurisation), la pharmacie (contrôle de la taille des particules) et la production de biocarburants.

L'activité métrologique émergente concernant la mesure dynamique des grandeurs mécaniques, telles que la force et le couple, a révélé un domaine totalement nouveau où l'accélération linéaire et l'accélération angulaire deviennent des grandeurs fondamentales pour la traçabilité des grandeurs dérivées. L'un des secteurs les plus connus est celui des crash-tests automobiles pour lequel les mesures dynamiques sont fondamentales. Malgré l'existence d'étalons internationaux largement acceptés, les résultats ne sont pas, dans de nombreux cas, strictement comparables en raison de l'absence d'étalonnages adéquats et d'un manque de connaissances approfondies de la métrologie dynamique. L'infrastructure métrologique actuellement en place pour les grandeurs mécaniques dynamiques, à savoir les vibrations et les chocs, accuse un retard important par rapport à l'infrastructure établie pour les mesures de l'accélération.

Applications émergentes concernant les capteurs à microsystèmes électromécaniques

La traçabilité des mesures de l'accélération au cours d'un choc est requise par la recherche, l'industrie, la médecine et l'armée. Le défi est de couvrir une large gamme d'applications avec un nombre réduit de techniques d'étalonnage et de méthodes efficaces. Les accéléromètres à microsystèmes électromécaniques ont d'abord été utilisés dans les applications automobiles de détection de collision et de contrôle des airbags. Dans ce domaine, les accéléromètres mesurent en continu l'accélération de l'automobile. La courbe d'accélération est intégrée afin de déterminer si un changement important de vitesse a eu lieu et, s'il excède un seuil prédéterminé, l'airbag est déclenché. La décision de déclencher les airbags doit être prise en une milliseconde : cette opération doit être extrêmement fiable car toute erreur peut conduire à un décès ou à la perte d'un membre. Parmi les applications automobiles des accéléromètres figurent également le contrôle dynamique du véhicule, la détection de retournement, des systèmes antivol, des systèmes de frein de stationnement électronique et des systèmes de navigation du véhicule. Puisque la vie humaine est en jeu en cas de dysfonctionnement de ces systèmes, les accéléromètres sont testés, étalonnés et subissent des tests exhaustifs de fiabilité.

Le développement des véhicules autonomes progresse rapidement. En 2018, aucun véhicule totalement autonome n'était autorisé sur les voies publiques. Les spécifications des accéléromètres relatives au guidage inertiel de véhicules autonomes seront les plus strictes possibles par rapport aux autres applications mentionnées précédemment : en effet, en cas de perte du signal GPS, la position du véhicule doit être déterminée par le système de guidage inertiel sur une période de temps pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de minutes. La conception actuelle des accéléromètres et gyroscopes capacitifs à microsystèmes électromécaniques pourrait ne jamais satisfaire aux exigences requises pour une conduite totalement autonome et pourrait nécessiter de remplacer les systèmes capacitifs par des systèmes optiques.

Société et sécurité au travail

Le bruit produit par diverses sources telles que les transports (routiers, ferroviaires, aériens), les usines et les parcs éoliens, le voisinage, les événements sportifs et de divertissement, nuit à l'environnement et à la qualité de vie.

Les exigences en matière de traçabilité et de reconnaissance mutuelle des résultats de mesures sont nécessaires à la sécurité des travailleurs. La réponse humaine aux vibrations mécaniques, domaine dans

lequel le concept de dose est appliqué, constitue un problème. L'audition est couramment mise en danger du fait d'une exposition excessive au bruit produit par l'homme. Les actions visant à réduire ces risques requièrent d'importantes dépenses chaque année. L'évaluation à grande échelle de l'exposition au bruit des travailleurs ou des individus nécessitera de développer de nouvelles approches et des instruments innovants.

Les transducteurs de vibrations à basse fréquence sont très utilisés pour surveiller les tremblements de terre. La demande de systèmes de surveillance des tremblements de terre s'est accrue suite à un certain nombre d'incidents majeurs. Des capteurs spéciaux assurent la traçabilité de milliers de sismomètres et de centaines de stations d'observation du Réseau sismographique mondial (Global Seismographic Network, GSN) qui alerte immédiatement la population et requiert des étalonnages à des fréquences très basses.

Activités de transformation numérique

Des ensembles de données d'essai sont nécessaires pour valider les données d'apprentissage et pour étudier les performances des systèmes. Le défi dans ce domaine est celui d'étalonner des instruments numériques contenant des capteurs intégrés à des systèmes de traitement des signaux numériques. C'est le cas des enregistreurs marins autonomes où le capteur de l'hydrophone est intégré à un système numérique comprenant des étapes de traitement du signal numérique. Le déploiement massif de réseaux de capteurs et de l'intelligence artificielle va exiger de nouvelles stratégies d'évaluation métrologiques.

Données sur le CCAUV

CCAUV établi en 1998

Président :	H. Laiz
Secrétaire exécutive :	G. Panfilo
Composition :	18 membres, 3 organismes de liaison et 13 observateurs
Liste des membres et des observateurs :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccauv/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	16-18 novembre 2021, 26-27 septembre 2019
Rapports complets des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccauv/publications
Trois groupes de travail :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccauv

- Comparaisons clés
- Coordination des organisations régionales de métrologie
- Stratégie

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCAUV (et comparaisons supplémentaires)	18	2	17
Comparaisons clés des organisations régionales de métrologie (et comparaisons supplémentaires)	40	12	-
Comparaisons du BIPM	0	0	0
Études pilotes du CCAUV	4	0	0
CMCs	1 294 CMCs dans 51 catégories de service publiées dans la KCDB		

43. Rapport du Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM (JCRB)

M. James Olthoff, représentant du CIPM auprès du JCRB, indique que le rôle du JCRB est de s'assurer du bon fonctionnement du CIPM MRA par l'intermédiaire des représentants des organisations régionales de métrologie et du BIPM qui participent aux réunions du JCRB. Début novembre 2022, la base de données des comparaisons clés du CIPM MRA (KCDB) comptait 25 963 CMCs et 1799 comparaisons clés et supplémentaires. De 2019 à 2022, plus de 1000 nouvelles CMCs et plus de 50 rapports de comparaison ont été ajoutés à la KCDB chaque année. De plus, le JCRB a examiné chaque année le processus d'examen de la qualité de chaque région. M. Olthoff ajoute qu'après plus de deux décennies d'existence, le CIPM MRA reste un mécanisme très actif et efficace.

M. Olthoff indique que l'un des changements les plus importants depuis 2018 réside dans l'intégration de GULFMET au JCRB. Les laboratoires nationaux de métrologie de GULFMET ont travaillé dur pour remplir les exigences nécessaires pour que GULFMET devienne une organisation régionale de métrologie membre du JCRB, les progrès qu'ils ont réalisés au fil du temps méritent d'être salués. En 2021, le JCRB a recommandé au CIPM d'accepter GULFMET comme membre à part entière du JCRB, ayant pouvoir de délibérer et de voter lors des réunions. Le CIPM a accepté cette recommandation et l'admission de GULFMET a été formalisée par la Décision CIPM/110-13.

M. Olthoff rappelle que le JCRB a dû s'adapter afin de poursuivre ses activités pendant la pandémie de Covid-19. Les réunions du JCRB ont été organisées en ligne avec succès, sous forme hybride ou intégralement à distance. Toutes les organisations régionales de métrologie ont pu être représentées au cours de chaque réunion. Dans quelques cas, il a été nécessaire pour le JCRB d'accorder des délais supplémentaires concernant l'examen de certains systèmes de management de la qualité par les organisations régionales de métrologie, lorsque ces systèmes n'avaient pas pu être réexaminés et approuvés dans le délai prévu de cinq ans en raison de la pandémie de Covid-19. Cette situation ne s'est pas présentée fréquemment, les organisations régionales de métrologie ayant développé des outils hybrides afin d'organiser la révision par les pairs des systèmes de management de la qualité des laboratoires membres, ce qui a permis de s'assurer, dans la majorité des cas, que l'examen était réalisé dans les délais prévus.

M. Olthoff explique qu'un travail considérable a été effectué depuis 2018 afin d'améliorer la mise en œuvre du CIPM MRA. Il souligne que les révisions des normes ISO/IEC 17025 et ISO 17034 garantissent que tous les laboratoires nationaux de métrologie et laboratoires désignés déclarant des CMCs dans le cadre du CIPM MRA ont démontré la conformité de leurs systèmes de management de la qualité aux normes révisées. Cette activité a exigé un travail conséquent de la part des laboratoires nationaux de métrologie et du JCRB. Le JCRB a salué les efforts du BIPM quant à la mise en œuvre du programme de renforcement des capacités et de transfert des connaissances (CBKT). L'accent mis par le programme sur la mise en œuvre du CIPM MRA, le fonctionnement fondamental de la KCDB et la procédure d'approbation des CMCs a largement permis de rendre le CIPM MRA plus accessible et de faciliter la participation et l'intégration de différents pays au CIPM MRA.

La KCDB 2.0 a été lancée en 2019 et le précédent système a été mis hors ligne en 2021. Toutes les CMCs sont désormais traitées à l'aide du nouveau système. Une étude menée en 2022 a confirmé que les efforts dédiés à l'amélioration de l'efficacité des activités liées au CIPM MRA ont permis une réduction des délais d'examen qui sont passés de 140 jours à moins de 100. En 2021, le BIPM, soutenu par un effort considérable des organisations régionales de métrologie, a réécrit et révisé les documents décrivant le fonctionnement du CIPM MRA. En résulte un ensemble plus cohérent de documents distincts qui facilite la compréhension du fonctionnement du CIPM MRA.

Les brochures sur le CIPM MRA ont été publiées en trois langues en 2022, faisant de l'accessibilité un objectif prioritaire.

Le président remercie M. Olthoff.

44. Rapport du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM)

M. Pavel Neyezmakhov, représentant du CIPM auprès du JCGM, fait la déclaration suivante[35] :

> « *Je souhaiterais utiliser le privilège de membre du CIPM présent en personne à la Conférence générale pour vous transmettre à tous, chers membres des délégations des États Membres et des Associés à la CGPM, un message très important. Le système métrologique de l'Ukraine fonctionne et remplit sa fonction principale : protéger les citoyens et l'économie nationale des conséquences de résultats de mesure erronés. Depuis le premier jour du conflit, j'ai reçu un nombre impressionnant de lettres exprimant votre sympathie et votre inquiétude. Je tiens à vous remercier pour tout cela, ainsi que pour l'opportunité offerte aux métrologistes ukrainiens ayant fui, pour leurs enfants, les horreurs de la guerre et se retrouvant dans vos pays de travailler dans les laboratoires nationaux. Je vous remercie pour les déclarations faites par différentes délégations lors de l'ouverture de la réunion. Je vous prie d'accepter toute ma gratitude pour l'aide que vous apportez à l'Ukraine.* »

M. Neyezhmakov rappelle que la métrologie, la science des mesures et de leurs applications, repose sur de nombreuses notions et définitions. L'utilisation d'une même langue ainsi que la compréhension et l'interprétation sans ambiguïté des résultats de mesure par les différentes parties prenantes de la métrologie sont capitales. Le JCGM a été créé dans ce but. Huit organisations sont membres du comité : le BIPM, l'IEC, l'IFCC, l'ILAC, l'ISO, l'OIML, l'IUPAC et l'IUPAP. La mission du JCGM est de maintenir et de promouvoir l'utilisation du Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie (le VIM) et du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (le GUM). Le travail du JCGM s'organise autour de ses deux Groupes de travail : le Groupe de travail 1 en charge du GUM et le Groupe de travail 2 en charge du VIM.

Les principes du GUM sont utilisés dans le monde entier. Une révision des documents d'orientation du GUM a été décidée afin de s'adapter efficacement à un monde en rapide évolution. Ainsi, le document « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure — Partie 6 : Élaboration et utilisation des modèles de mesure » a ainsi été publié en décembre 2020. Il s'agit du premier document publié dans le cadre de la « nouvelle perspective » du GUM. L'élaboration de documents supplémentaires est en cours, conformément à une feuille de route spécifique. Le Groupe de travail 1 sur le GUM a de plus commencé à étudier la place de l'incertitude de mesure dans le cadre numérique du SI, les certificats d'étalonnage numériques et le *Web Ontology Language*.

Le Groupe de travail 1 sur le GUM et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) ont organisé un atelier commun sur l'incertitude de mesure en météorologie et en climatologie les 5 et 6 avril 2022. L'atelier a contribué à mettre en avant la coopération entre le Groupe de travail 1 sur le GUM et l'équipe d'experts de l'OMM sur l'incertitude de mesure (ET-MU). L'atelier avait pour objectif de déterminer le niveau actuel de convergence dans le domaine de l'incertitude de mesure, ainsi que d'identifier des défis prioritaires et les moyens de les relever.

Le Vocabulaire international de métrologie (VIM) est un document d'orientation destiné à disséminer des connaissances scientifiques et technologiques dans le domaine de la métrologie en harmonisant la

[35] Traduction du BIPM de la déclaration donnée en anglais lors de la Conférence.

terminologie fondamentale associée. L'année 2021 a marqué une étape importante pour le Groupe de travail 2 avec la publication du projet de comité du VIM4 (VIM4 1CD) et l'organisation d'un webinaire qui a permis un engagement plus large et une consultation des parties prenantes et de l'ensemble de la communauté de la métrologie. Le webinaire s'est concentré sur la nouvelle structure ainsi que sur les changements majeurs introduits par le VIM4. Chaque nouvelle édition du VIM constitue une opportunité de réviser et d'améliorer la structure du document. Cela a de nouveau été le cas avec le VIM4, qui comprend un nouveau chapitre sur les propriétés qualitatives et sur les examens. Le premier projet VIM4 1CD a fait l'objet de plus de 1700 commentaires. En raison de la longueur de la période de consultation et du grand nombre de commentaires reçus à la suite de la publication du VIM4 1CD, il a été convenu de publier au moins un nouveau projet (VIM4 2CD) afin de rassembler de nouveaux commentaires.

L'une des questions les plus importantes abordées par le VIM4 réside dans l'objectif d'offrir des définitions lisibles par machine. À cette fin a été créé le Groupe de travail du CCU sur les termes métrologiques fondamentaux, avec pour mission d'identifier des termes essentiels de la métrologie dans le but de rendre leurs définitions lisibles par machine. Le Groupe de travail du CCU collabore avec des experts des mathématiques, de la linguistique et de la sémantique ainsi que des membres du Groupe spécifique et du groupe d'experts du CIPM sur le SI numérique, de CODATA et des groupes du VIM. Les experts ont conclu que le processus complet de développement de définitions lisibles et exploitables par machine de termes métrologiques fondamentaux exige plus de temps du fait de la complexité de cette mission. Le but est d'élaborer des documents au contenu lisible, exécutable et interprétable par machine, l'objectif final étant de permettre à des machines de prendre des décisions sans intervention humaine.

Le président remercie M. Neyezmakhov.

Sixième séance – 18 novembre 2022 (matin)

Le président de la réunion souhaite la bienvenue aux délégués pour cette sixième séance.

45. Mettre en œuvre le nouveau Système international (briser la chaîne invisible)

M. Schlamminger du National Institute of Standards and Technology (États-Unis) explique qu'en 2018, l'échelle internationale de masse était enchaînée à la seule définition du kilogramme. Cette situation n'a plus cours depuis le vote au cours de la 26e réunion de la CGPM (2018) qui a changé toutes les fondations du Système international d'unités. M. Schlamminger pose la question suivante : quels avantages ce changement a-t-il apportés ? Plutôt que de devoir retenir les sept « recettes » des unités de base, il suffit désormais de ne retenir que les sept constantes fondamentales qui les définissent. Jusqu'ici, certaines de ces « recettes » étaient de longues définitions, d'autres des définitions idiosyncratiques et au moins une combinait définition longue et idiosyncratique. Il n'est plus nécessaire de se souvenir de ces « recettes » puisque le système a été simplifié autant que nécessaire, sans pour autant l'être trop. Sa beauté réside dans sa simplicité.

Quatre des sept constantes utilisées sont des constantes fondamentales : la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Les constantes fondamentales ont plusieurs propriétés essentielles. Comme leur nom l'indique, elles sont constantes. Elles gardent donc toujours la même valeur à tout moment et en chaque point de l'univers. Cette propriété est loin d'être triviale, il en découle que les constantes fondamentales sont identiques quelle que soit l'échelle.

M. Schlamminger prend pour exemple la mesure d'une distance : la vitesse de la lumière reste la même que l'on mesure une longue distance comme celle qui sépare la Terre de la Lune ou une distance beaucoup plus courte, à l'échelle d'une puce électronique par exemple. La lumière parcourt 300 millions de mètres par seconde. Elle met une seconde pour aller de la Terre à la Lune mais seulement une attoseconde (10^{-18} secondes) pour aller d'un composant de circuit intégré à un autre ; pourtant, la distance est calculée à l'aide d'une même constante fondamentale.

M. Schlamminger rappelle que l'échelle des masses est aussi colossale que celle des distances. Le corps le plus lourd jamais pesé par l'Homme est un trou noir issu de la fusion de deux autres trous noirs et dont la masse totale représente 142 fois celle du soleil, soit près de 3×10^{32} kg. La masse la plus faible jamais mesurée est celle du neutrino, de près de 3×10^{-28} kg. L'échelle entière couvre 60 ordres de grandeur et n'était auparavant rattachée qu'à un point unique : le kilogramme. Il n'était possible de mesurer qu'un domaine réduit à l'aide de multiples et de sous-multiples du kilogramme. Avant 2018, les faibles masses étaient en général mesurées en électronvolts et ne pouvaient être converties en kilogramme sans erreurs et incertitudes liées à l'extension de l'échelle des masses. Le SI révisé permet de mesurer toutes ces masses en kilogrammes sans erreurs de conversion. Il est ainsi possible de mesurer des masses subatomiques comme astronomiques à l'aide de la même unité. M. Schlamminger ajoute qu'en plus d'être invariantes d'échelle, les constantes fondamentales sont universelles. Cette propriété avait permis à Max Planck d'imaginer dès 1899 un système d'unités utilisable par toutes les civilisations, y compris celles extra-terrestres ou non-humaines. Ce système a vu le jour.

M. Schlamminger donne un exemple de chaîne de traçabilité pour les masses. Afin d'envoyer un colis par la poste, il faut l'emmener dans un bureau de poste où il sera pesé pour déterminer le prix d'envoi du colis. Comment la masse du colis est-elle déterminée ? Jusqu'à présent, la chaîne de mesure débutait au BIPM, où est conservé le prototype international du kilogramme dans un coffre-fort dont il était

sorti tous les 50 ans environ pour une campagne d'étalonnage. La mesure obtenue était ensuite transférée aux laboratoires nationaux de métrologie possédant leur propre prototype national. Chaque pays dispose de sa propre chaîne de dissémination ; par exemple, les 50 états des États-Unis ont chacun un bureau des poids et mesures. Ces bureaux recevaient la donnée de masse et la transféraient, au bout de la chaîne, à chaque bureau de poste. M. Schlamminger ajoute que les bureaux de poste ne représentent qu'une portion infime de l'activité économique mais comme ils sont au niveau le plus bas de l'échelle, ils doivent effectuer des millions de pesées. Cette organisation pyramidale remonte à la construction des pyramides elles-mêmes : en Égypte antique, lorsque les tailleurs de pierres utilisaient des bâtons comme règles qu'ils devaient étalonner avec un bâton étalon. La même chaîne de dissémination était toujours utilisée 4000 ans plus tard, avec cette nécessité d'effectuer régulièrement des comparaisons par rapport à des étalons. La révision du SI a fait voler cette chaîne en éclats. Ce changement a permis de surmonter le problème de l'incertitude qui ne faisait que d'augmenter le long de la chaîne, les mesures effectuées au bureau de poste étant moins bonnes que celles réalisées au BIPM.

Les métrologistes travaillent sur des balances de Kibble de nouvelle génération. Auparavant de la taille d'une voiture, ces équipements très complexes ont été construits pour mesurer des masses de 1 kg. La prochaine phase de développement est de créer des balances plus compactes capables de mesurer des masses comprises entre un milligramme et 50 grammes. Ces dernières pourront être utilisées au sein même des usines pour peser, par exemple, des produits pharmaceutiques. Ces balances de Kibble se défont de deux chaînes : celle raccordée au BIPM ainsi que celle utilisée pour subdiviser le kilogramme en des valeurs plus faibles. La situation n'est toutefois pas si simple : la seule mesure de la masse a été remplacée par deux mesures électriques, celle de la tension et celle de l'impédance. Ceci peut paraître complexe mais ces deux grandeurs, l'impédance et la tension, peuvent être mesurées à l'aide d'effets de volume. Comme le volume est identique où que l'on se situe dans le monde, il est possible d'effectuer des mesures partout dans le monde sans se rattacher à une chaîne. Les unités de tension et de résistance peuvent être mises en pratique dès lors que des personnes disposent du savoir-faire et de l'équipement requis. Les balances de Kibble sont en général employées pour mesurer des masses importantes alors que pour la mesure de masses inférieures à un gramme, la balance à force électrostatique est privilégiée.

M. Schlamminger indique que la masse n'est pas la seule unité mécanique à pouvoir être mesurée à l'aide du SI révisé. La mesure du pied-livre, utilisé dans certains pays comme unité de couple, aux États-Unis par exemple, est rendue fastidieuse par les dix poids nécessaires pour obtenir une livre avec un jeu de masses métriques, chaque poids devant être mesuré individuellement. La balance de Kibble constitue une solution car ses principes peuvent être exploités pour réaliser des mesures de couple. Le principe suit celui d'une balance de Kibble traditionnelle, dont la bobine se déplace linéairement. Afin de mesurer le couple, la bobine effectue une rotation, ce qui permet d'obtenir un étalonnage en continu. La mesure n'est plus réalisée ponctuellement en des points définis (un pied-livre, deux pieds-livres) mais le long d'un spectre continu. La quasi-instantanéité des mesures est un autre avantage de cette méthode. Au Japon, une équipe de chercheurs met au point une balance de couple dynamique qui permet de réaliser des mesures de couple directement depuis l'axe d'une machine en rotation, une éolienne par exemple.

Les unités mentionnées précédemment appartiennent toutes au domaine de recherche du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM). Cependant, les résultats obtenus à l'aide de cette technologie s'étendent au-delà et concernent notamment le becquerel. La mesure de l'activité massique des composés radioactifs volatils, notamment ceux utilisés pour traiter les cancers, exige de mesurer leur masse et leur activité très rapidement du fait de la désintégration de la substance. Cette technologie offre également l'avantage de pouvoir se tenir plus loin de la substance radioactive.

L'utilisation d'une balance à force électrostatique permet d'effectuer des mesures de l'activité massique de composants radioactifs volatils à une distance plus sûre et offre une meilleure traçabilité.

La mesure des rayonnements optiques à l'aide de balances utilisées pour mesurer la puissance de lasers à haute énergie constitue un autre exemple. Cette mesure de puissance était auparavant obtenue en dirigeant un laser vers un réservoir d'eau et en mesurant la vitesse à laquelle l'eau gagnait en température. Cependant, ce processus détruisait le rayon laser qui ne pouvait plus être utilisé pour le but dans lequel il avait été conçu. Une balance de puissance laser réfléchit le faisceau laser sur un miroir monté dans une balance électrostatique, ce qui permet de le guider dans la direction voulue tout en mesurant sa puissance *in situ*. M. Schlamminger ajoute que la balance à puissance laser fait le lien avec le début de sa présentation. La masse du trou noir qu'il a mentionnée en évoquant l'échelle des masses a été mesurée par l'Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser (LIGO), dont la puissance du laser peut être mesurée par une balance de puissance laser.

M. Schlamminger conclut que la métrologie est une science du peuple pour le peuple. Le SI révisé concerne tous les pays représentés lors de la Conférence générale. Au cours de la 26e réunion de la CGPM (2018), les délégués ont voté pour la démocratisation des mesures. Tant que le kilogramme dormait dans un coffre-fort qui ne pouvait être ouvert qu'avec trois clés différentes, seuls quelques élus avaient accès à l'unité de masse. Maintenant que les unités de masse sont à la disposition de chaque personne sur la planète, le SI est démocratisé. De la même façon que la révolution du « matériel libre » illustrée par le microscope OpenFlexure utilisé en Afrique subsaharienne pour le diagnostic du paludisme et d'autres maladies infectieuses, le concept de « métrologie ouverte » peut être très riche de sens. Les citoyens métrologistes ayant accès à toutes les unités contribueront à atteindre et à mesurer le degré de progression vers les objectifs de développement durable adoptés par tous les États Membres des Nations Unies.

Le président remercie M. Schlamminger et ouvre la discussion.

M. Härtig (Allemagne) demande à quel horizon temporel des balances de Kibble compactes pourraient être disponibles. M. Schlamminger répond que leur développement prendra beaucoup de temps mais qu'il n'est pas irréaliste d'imaginer d'ici une vingtaine d'années des appareils compacts utilisant des étalons quantiques. Il ajoute qu'accomplir des prouesses nécessite d'abord de voir grand.

M. Milton rappelle que M. Schlamminger a publié un article[36] intéressant début 2022 sur la question de la définition du kilogramme et de sa mise en œuvre comme masse inertielle ou comme masse gravitationnelle. Il explique avoir espéré que l'article nourrisse des réflexions sur le sujet et demande à M. Schlamminger un commentaire en rapport avec la diapositive qui montrait la différence d'échelle entre la masse d'un trou noir et celle d'un neutrino. Il lui demande également si c'est une masse inertielle ou une masse gravitationnelle qui a été définie. M. Schlamminger répond que la définition précédente, qui reposait sur le prototype international du kilogramme, donnait une masse gravitationnelle. La balance de Kibble, elle, définit une masse inertielle. À l'échelle astronomique, certaines mesures utilisent une masse inertielle. Cette masse n'est pas encore parfaite car pour les masses astronomiques, la constante gravitationnelle, G, doit être fixée pour convertir le résultat en kilogrammes.

[36] G Mana and S Schlamminger, The kilogram: inertial or gravitational mass?, 2022, *Metrologia*, **59**, 043001 https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac7ca7

46. Rapport du président du CCM

M. Philippe Richard, président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), présente son rapport sur les activités du CCM depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCM

Le CCM dispose de groupes de travail actifs qui couvrent des domaines métrologiques variés, tels que la réalisation de l'unité de masse, la dissémination de l'unité de masse, la masse volumique et la viscosité, la force et le couple, la pression et le vide, le débit de fluides, la dureté et l'accélération gravitationnelle. Le Groupe de travail du CCM sur la stratégie et la coordination du MRA a pour objectif de fournir des orientations quant à la coordination et à l'harmonisation de ces activités.

La plus grande part de l'activité du CCM consiste actuellement à préparer la transition de l'actuelle définition du kilogramme à une nouvelle définition en suivant une note détaillée[37] élaborée afin d'organiser le travail requis.

Toutefois, tous les groupes de travail du CCM ne sont pas concernés par ce changement mais tous ont pour mission d'améliorer les aptitudes techniques existantes ou de développer de nouvelles aptitudes.

Domaine de compétence du CCM

Les activités du CCM concernent les questions liées à la réalisation et à la dissémination de l'unité de masse suite à la redéfinition du kilogramme en 2019 à partir de la constante de Planck, à l'établissement de l'équivalence internationale entre les laboratoires nationaux pour la masse et pour un certain nombre de grandeurs apparentées (masse volumique, pression, force, débit de fluides, viscosité, dureté, accélération gravitationnelle), ainsi que les conseils donnés au CIPM sur les activités précédemment mentionnées.

Stratégie

Une révision intégrale de la stratégie du CCM a été réalisée par le Groupe de travail sur la stratégie et la coordination du MRA en 2021. Le document de stratégie du CCM pour les années 2022 à 2032, adopté par correspondance par le CCM en mars 2022, est disponible sur les pages du CCM sur le site internet du BIPM.

Le document de stratégie offre une vue d'ensemble des principaux défis scientifiques, économiques et sociaux que peuvent contribuer à relever les mesures de masse et des grandeurs apparentées dans sept domaines définis par le BIPM afin de répondre aux besoins d'une métrologie en constante évolution. La révision du SI de mai 2019 permet la réalisation de l'unité de masse et de certaines grandeurs apparentées directement à partir de constantes fondamentales. Les mesures directement traçables au SI, les mesures dynamiques et l'extension de la gamme et des conditions de réalisation des mesures seront les principaux thèmes de recherche pour la décennie à venir.

Le CCM a fixé trois buts stratégiques pour la période 2022-2032. Il est ainsi prévu que le CCM participe aux progrès de la science des mesures dans tous les domaines techniques qu'il couvre. Gérer la transition d'une dissémination coordonnée du kilogramme à l'échelle internationale vers l'utilisation de réalisations individuelles et souveraines reste la préoccupation principale quant au fait d'assurer la comparabilité mondiale des mesures. Le CCM continuera à mettre en œuvre le CIPM MRA par l'organisation efficace de comparaisons clés et par la coordination de comparaisons clés et supplémentaires des organisations régionales de métrologie. Le CCM contribuera également à la mise en œuvre du cadre numérique du SI en métrologie des masses et des grandeurs apparentées. Le CCM

[37] Note détaillée sur le processus de dissémination après la redéfinition du kilogramme, disponible sur la page web du CCM. https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm

cherche à encourager l'engagement des parties prenantes et le transfert de connaissances en poursuivant l'organisation de séminaires et de webinaire, ainsi qu'à mettre en place des collaborations plus importantes avec d'autres comités consultatifs et avec des organismes extérieurs.

Le CCM supervise le programme de travail des laboratoires de masse du BIPM.

Activités et réalisations depuis la précédente réunion de la CGPM

Principales activités et réalisations

Deux réunions du CCM se sont tenues entre 2019 et 2022, l'une les 16 et 17 mai 2019 et l'autre les 20 et 21 mai 2021. Les rapports des réunions du CCM et la majorité des présentations et documents de travail sont disponibles sur les pages internet du CCM. Un séminaire portant sur les nouvelles activités et avancées dans le domaine des masses et des grandeurs apparentées a été organisé pendant la réunion de 2019. Exceptionnellement, la réunion de 2021 s'est tenue en ligne en raison des restrictions de déplacement. La note détaillée sur les phases de la dissémination du kilogramme, préparée par le Groupe de travail sur les phases de la dissémination du kilogramme, a été approuvée et la progression des activités prévues dans la note a été passée en revue pendant ces réunions. Les décisions principales prises au cours de ces deux réunions sont les suivantes :

- fusionner le Groupe de travail sur la réalisation du kilogramme et le Groupe de travail sur la dissémination du kilogramme en un unique Groupe de travail sur la masse ;
- nommer/renommer l'ensemble des présidents et vice-présidents des groupes de travail du CCM ;
- réviser les termes de référence du Groupe de travail sur la gravimétrie et du Groupe de travail sur les phases de la dissémination du kilogramme pour mieux refléter les activités menées et les questions abordées au sein des groupes ;
- formuler une requête du CCM auprès du JCRB sur la possibilité d'ajouter une note explicative qui clarifie l'Annexe A1 du document CIPM-MRA-P11.

L'INMETRO (Brésil) et l'IPQ (Portugal) sont devenus membres du CCM en 2019. Le CMS/ITRI (Taipei chinois) et le NSC-IM (Ukraine) sont devenus observateurs du CCM en 2021.

Concernant la réalisation et la dissémination de la nouvelle définition du kilogramme, la première comparaison clé CCM.M-K8 des réalisations du kilogramme a été effectuée en 2019. Le BIPM a comparé des réalisations du kilogramme à partir de cinq balances de Kibble et de deux applications de la méthode XRCD (détermination de la masse d'un cristal à l'aide de rayons x). Les résultats de la comparaison, associés à ceux de l'étude pilote réalisée en amont, ont permis de calculer la première valeur de consensus du kilogramme. Les valeurs de masse fondées sur la valeur de consensus étaient inférieures de 2 µg à celles fondées sur le prototype international du kilogramme, avec une incertitude-type de 20 µg. La dissémination du kilogramme est entrée dans sa deuxième phase[38] le 1er février 2021, lorsque la valeur de consensus a commencé à être utilisée en tant que « valeur moyenne internationale du kilogramme ». Puisque la différence entre les valeurs de masse fondées sur la traçabilité précédente et les nouvelles valeurs est faible par rapport à l'incertitude, l'échelle internationale de masse n'a pas eu besoin d'être ajustée. Toutefois, des ajustements ont dû être apportés aux aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMCs) de 31 laboratoires nationaux de métrologie afin de tenir compte de l'incertitude de la valeur de consensus. Le BIPM a préparé une note d'information sur les conséquences de la redéfinition du kilogramme sur les incertitudes des étalonnages de masse mentionnées sur les certificats d'étalonnage délivrés par le BIPM avant le 20 mai 2019. La note a été transmise à tous les clients concernés. L'article « *Beginning a new phase of the dissemination of the kilogram* » (Le début d'une nouvelle phase de dissémination du kilogramme),

[38] Période de transition pendant laquelle la dissémination de l'unité de masse se fonde sur une valeur de consensus calculée à partir des résultats de mesure des trois comparaisons des réalisations primaires.

rédigé par le président du Groupe de travail sur la masse, le président du Groupe de travail sur les phases de la dissémination du kilogramme et le BIPM est paru dans *Metrologia* en 2021.

La deuxième comparaison clé des réalisations du kilogramme a débuté fin 2021. Le nombre de participants est passé de 7 à 9 par rapport à la première comparaison. La comparaison de la masse des étalons de transfert par rapport à celle des étalons de travail du BIPM est terminée. La diffusion du projet de rapport A est en cours. Le résultat de la comparaison sera utilisé pour calculer la nouvelle valeur de consensus.

Le Groupe de travail sur la stratégie et la coordination du MRA a rédigé une version intégralement révisée de la stratégie du CCM pour 2022-2032. Le Groupe de travail établit les plans d'action annuels du CCM et contrôle sa progression. Concernant le CIPM MRA, le CCM a fait des remarques sur les documents d'orientation révisés du CIPM MRA. De plus, le CCM a fait part de ses besoins spécifiques et a participé à la mise en œuvre de la plateforme KCDB 2.0 et du nouveau site internet du BIPM. Le processus de validation des rapports de comparaison a été simplifié pour accélérer la publication des résultats de comparaison. Deux documents d'orientation du CCM, le document sur l'approbation et la publication des rapports finaux des comparaisons clés et supplémentaires (« *CCM Guidelines for approval and publication of the final reports of key and supplementary comparisons* ») et le modèle de rapport pour les comparaisons clés (« *CCM Key Comparison Report Template* ») ont été révisés. Dans le modèle de rapport, le chapitre portant sur les étalons de transfert a été amélioré. Le formatage du corps du texte et des exemples a été retravaillé afin d'améliorer leur lisibilité. Des documents spécifiques d'orientation consacrés à une approche « efficiente et efficace » de l'examen des CMCs ont été créés dans plusieurs Groupes de travail et sont en cours d'élaboration dans d'autres. Le CCM travaille avec les organisations régionales de métrologie et les laboratoires nationaux de métrologie à réduire le nombre de CMCs afin de respecter les recommandations établies lors de l'examen du CIPM MRA.

Défis et difficultés

La révision du SI et la redéfinition du kilogramme en 2019 ont constitué un changement majeur dans la façon dont l'unité de masse du SI est définie et dont les laboratoires nationaux de métrologie maintiennent et disséminent le kilogramme. Si les expériences de réalisation ont atteint des niveaux d'incertitude et d'équivalence satisfaisants pour redéfinir l'unité de masse en 2019, il reste du travail à fournir pour améliorer le nombre et la fiabilité des expériences ainsi que leur degré d'équivalence. La difficulté la plus critique rencontrée par le CCM réside dans la gestion de la phase de dissémination de la valeur de consensus prévue par la Recommandation G1 du CCM (2017) et dans la transition de la valeur de consensus à la dissémination à partir des réalisations individuelles. Un certain nombre de difficultés techniques doivent être résolues telle la détermination de la valeur de consensus ou la réduction de la dispersion entre les différentes réalisations.

Le CCM couvre une gamme très diverse de mesures. Les technologies nécessaires aux mesures sont de natures aussi variées que ne le sont les domaines industriels et scientifiques dans lesquels ces mesures sont utilisées. En raison de la diversité des mesures de masse et de grandeurs apparentées ajoutée à l'importance croissante des mesures de grandeurs dynamiques dans de nombreux domaines, le périmètre des bénéfices potentiels pour les utilisateurs finaux est très vaste. Une stratégie de maximisation de ces bénéfices exige de se concentrer sur les secteurs où les bénéfices peuvent être exploités le plus efficacement.

Des difficultés plus courantes doivent également être résolues en permanence. Elles comprennent notamment l'amélioration de l'efficacité du processus d'examen des CMCs et la réduction des délais nécessaires pour effectuer des comparaisons clés et communiquer leurs résultats.

Perspectives à court terme et à long terme

À la fin de l'année 2023, le CCM aura tenu sa 19e réunion (25-26 mai 2023) à la suite des réunions de la plupart de ses Groupes de travail (organisées plus tôt la même semaine), dont celui sur la stratégie et la coordination du MRA. Les principaux objectifs de cette réunion plénière du CCM sont les suivants :

- passer en revue le processus de dissémination du kilogramme, y compris des résultats de la deuxième comparaison clé CCM.M-K8 des réalisations du kilogramme, et examiner le calcul et l'utilisation de la deuxième valeur de consensus ;
- examiner et approuver le protocole de la troisième comparaison clé des réalisations du kilogramme ;
- nommer/renommer l'ensemble des présidents des groupes de travail.

Comme pour les précédentes réunions du CCM, il sera demandé à chaque membre du CCM de rédiger un rapport sur les activités scientifiques pertinentes. Un atelier consacré aux nouvelles activités et évolutions dans des domaines métrologiques d'intérêt pour le CCM sera organisé.

D'ici la fin de 2024, le CCM espère achever la troisième comparaison clé des réalisations du kilogramme afin de calculer une troisième valeur de consensus pour la dissémination de l'unité de masse.

Sur le long terme, c'est-à-dire à compter de 2024, le CCM espère améliorer sa connaissance concernant l'état des réalisations du kilogramme et renforcer l'infrastructure qui lui permettra d'atteindre les objectifs suivants :

- réduire la dispersion entre les réalisations du kilogramme ;
- conduire la phase de dissémination de la valeur de consensus et la transition vers une dissémination à partir des réalisations individuelles du kilogramme ;
- garantir en permanence un nombre suffisant des réalisations primaires de l'unité de masse, si possible dans chaque région ;
- développer des appareils permettant de réaliser le kilogramme à partir de la constante de Planck qui soient moins onéreux et plus facilement manipulables (et également des appareils fondés sur de nouvelles idées, autres que la balance de Kibble et la méthode XRCD) et qui seront utilisés par les laboratoires nationaux de métrologie ;
- développer des instruments commerciaux pour la réalisation du kilogramme et ses sous-multiples qui seront utilisés dans les laboratoires nationaux de métrologie à court terme et par un nombre de plus en plus important d'utilisateurs finaux sur le plus long terme ;
- continuer à développer les activités scientifiques et techniques des groupes de travail du CCM conformément à la stratégie du CCM et aux plans d'action de ses groupes de travail.

Données sur le CCM

CCM établi en 1980

Président :	P. Richard
Secrétaire exécutive :	H. Fang
Composition :	25 membres et six observateurs
Liste des membres et des observateurs :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccm/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	16-17 mai 2019, 20-21 mai 2021
Rapports détaillés des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccm/publications
Huit groupes de travail :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccm

- Stratégie et coordination du MRA
- Masse
- Masse volumique et viscosité
- Force et couple
- Pression et vide

– Débit de fluides
– Dureté
– Gravimétrie

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCM (et comparaisons supplémentaires)	98	13	4
Comparaisons du BIPM	0	0	0
Études pilotes du CCM	4	2	0
CMCs	2 965 CMCs dans 36 catégories de services publiées dans la KCDB		

47. La métrologie au service des réseaux d'énergie durables de demain

Mme Sonja Berlijn, professeure en systèmes d'énergie intégrés durables au *KTH Royal Institute of Technology* (Suède), indique que sa présentation vise à expliquer l'importance primordiale de la métrologie pour la transition énergétique et pour les réseaux d'énergie. Elle note que les réseaux d'énergie durables de demain devront tenir compte des 17 objectifs de développement durable de l'Organisation des Nations Unies.

Mme Berlijn remarque que les objectifs à atteindre pour parvenir à la neutralité carbone d'ici 2050 sont nombreux et en cite quelques exemples. Le pacte vert pour l'Europe est un projet qui vise à faire de l'Europe le premier continent sans impact sur le climat d'ici 2050 tout en stimulant l'économie, en respectant la nature et en améliorant la santé et la qualité de vie de tous ses habitants, sans exception. REPowerEU doit permettre une réduction rapide de la dépendance européenne aux énergies fossiles en provenance de Russie en accélérant la transition vers les énergies propres et en unissant les puissances européennes pour construire un système d'énergie plus résilient au cœur d'une véritable Union énergétique. Les États-Unis ont de leur côté adopté l'*Inflation Reduction Act* qui sera accompagné de 369 milliards de dollars d'investissements dans la sécurité énergétique et le changement climatique ; le Japon a mis en œuvre son projet de transformation verte ; tandis que la république de Corée, la Chine et l'Inde se sont fixé des objectifs ambitieux en matière d'énergies propres.

Pour Mme Berlijn, ces objectifs peuvent être atteints ; en effet, les technologies nécessaires sont prêtes à être exploitées et leur coût s'élèverait à moins de 0,5 % du PIB. Certains secteurs seront difficiles à décarboner, comme l'industrie lourde productrice de plastique et d'acier ou encore le transport de charges lourdes (secteur maritime ou aérien). Les moyens techniques de décarbonation sont nombreux : électrification, utilisation de l'hydrogène, bio-carburants, et technologies de capture et de stockage du dioxyde de carbone. La poursuite de ces projets ira de pair avec une augmentation de la demande d'électricité qui ira d'un facteur quatre à six en Europe et jusqu'à sept à l'échelle mondiale. Cette hausse de la demande exigera d'augmenter les capacités de transmission et de stockage de l'électricité.

Le World Energy Outlook 2022[39] de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) contient un rapport sur la manière de décarboner les marchés de l'énergie qui prévoit une multiplication par sept de la production

[39] https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022

d'électricité. L'Europe n'a réussi à augmenter sa production que de 30 % au cours des 20 dernières années. Cette capacité devra augmenter de 300 % d'ici 2050 et les sources d'énergie propres comme l'éolien et le solaire devront remplacer le charbon et le gaz. Mme Berlijn ajoute qu'en Europe, beaucoup de travail a été accompli pour imaginer les réseaux d'électricité de demain, les ingénieurs ayant prévu cette situation depuis plusieurs années. En plus des projets de nouvelles infrastructures électriques, la transition énergétique repose sur des modes de production plus nombreux et alternatifs, des installations de stockage plus importantes et plus nombreuses ainsi qu'une flexibilité accrue. La construction de toutes ces infrastructures prend du temps en raison des procédures démocratiques à suivre.

Mme Berlijn explique que les investissements « verts » comportent de nombreux avantages : le pacte vert pour l'Europe permettra d'éviter l'émission de 55 mégatonnes de CO_2 chaque année. Répondre aux besoins ainsi soulevés avant 2040 nécessite d'investir 45 milliards d'euros, ce qui aura des répercussions directes sur la croissance et l'emploi. Le pacte vert pour l'Europe sera bénéfique pour l'environnement, créera des emplois et améliorera le bien-être de tous ; toutefois, des entraves aux progrès subsistent. Le problème majeur, celui de la stabilité de l'approvisionnement, pose de plus en plus de difficultés. En effet, l'offre et la demande d'énergie doivent être à l'équilibre à chaque instant du jour et de la nuit. Si la production et la consommation ne sont pas identiques, le réseau s'expose à des fluctuations de fréquence. En cas de surproduction d'électricité, la fréquence augmente. En cas de demande excessive, la fréquence chute. Se pose en plus le problème des sources intermittentes d'énergie, telle l'énergie éolienne ou lorsque des équipements sont en veille. La question de l'équilibre de la production et de la demande devient de plus en plus difficile à gérer, les évènements se multiplient et le temps pour agir se réduit. L'inertie est le propre du système énergétique, mais le temps se contracte ; s'il était précédemment possible de prendre jusqu'à sept secondes pour agir, ce délai est aujourd'hui quasi-nul. Avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs du réseau, l'équilibre de l'offre et de la demande est toujours plus difficile à atteindre.

Les énergies renouvelables représentent un défi en raison de l'écart entre la capacité de production des équipements et la production réelle. Auparavant, il était possible de garantir une production d'énergie extrêmement stable tandis que la production éolienne et photovoltaïque implique une grande volatilité à long terme. L'installation de panneaux solaires fait face à la difficulté des courbes de consommation journalières ; en effet, les entreprises sont peu enclines à passer à l'énergie solaire à grande échelle en raison des investissements importants de capitaux nécessaires pour ne produire de l'énergie que quelques heures par jour. Une capacité de stockage suffisante pour offrir de la flexibilité en fonction des heures sans pour autant changer la puissance maximale sera nécessaire pour relever ce défi.

Il semblerait que l'augmentation de la flexibilité et des capacités de stockage puisse avoir lieu plus vite que prévu, et ce en raison du prix inférieur de la génération d'électricité éolienne par rapport au charbon. Tandis que de nombreuses centrales à charbon font faillite, les grandes entreprises du secteur de l'énergie lancent des projets d'électricité verte, destinées à faire partie de leur modèle commercial soutenable ou utilisées à des fins de marketing. Les autres défis majeurs résident dans le rétrécissement des marges de fonctionnement du système d'énergie et dans une multiplication des évènements d'exploitation inattendus. Par exemple, dans la région de Stockholm, 50 coupures d'électricité par an sont la conséquence de cyberattaques.

Mme Berlijn pose la question suivante : comment relever les défis posés par des bouleversements bien plus rapides que prévu. La communauté internationale de la métrologie aura un rôle majeur à jouer pour parvenir à surmonter les difficultés. Une solution réside dans le développement de systèmes d'énergie intégrés, reposant sur des mesures qui permettront une transformation numérique de toutes les infrastructures, nouvelles comme existantes. Ces systèmes intégrés d'énergie incluront de nombreuses technologies de production d'électricité innovantes et des améliorations seront apportées aux infrastructures existantes, tels des aéroports respectueux du climat et un transport maritime sans danger pour l'environnement. Les solutions à ces nombreux défis reposeront sur des infrastructures

nouvelles comme existantes, et seront intégralement mesurables, contrôlables et numériques. De plus, il est nécessaire d'améliorer la communication, les protocoles et les solutions de marché mais on observe surtout un réel besoin pour plus de mesures.

Mme Berlijn donne l'exemple de la nécessité d'améliorer le contrôle opérationnel des systèmes d'énergie, ce qui nécessitera la contribution de la communauté de la métrologie. Le contrôle opérationnel des systèmes d'énergie devra être capable de faire face à des évènements prévisibles ou non de plus en plus nombreux avec un temps de réaction réduit. Impossible d'obtenir ces résultats avec des systèmes de contrôle manuels ; ainsi, il est nécessaire d'automatiser les procédures opérationnelles, de protection et de contrôle. Il sera également nécessaire d'automatiser la flexibilité du système. La conception des nouveaux centres de contrôle reposera sur la transformation numérique pour résoudre des problèmes classiques avec des solutions numériques. De nouvelles formes d'innovation et de créativité devront être mises en œuvre au lieu de simplement renforcer et d'améliorer les anciennes méthodes. Les systèmes intégrés d'énergie ne reposant pas seulement sur des mesures à petite échelle, l'exactitude des mesures au niveau national voire continental est également essentielle. En raison de l'interconnexion du réseau européen d'électricité, un évènement survenu en Espagne, par exemple, affecte également l'exploitation au nord de la Norvège. Des efforts considérables seront ainsi nécessaires pour synchroniser l'ensemble de ces mesures.

Le développement des systèmes intégrés d'énergie nécessitera un meilleur contrôle des infrastructures actuelles, en raison du temps nécessaire pour en construire de nouvelles. L'utilisation des infrastructures existantes devra être largement améliorée, notamment à l'aide d'informations en temps réel sur la possibilité de coupures inopinées et sur la possibilité ou non d'utiliser les infrastructures de manière optimale. Tout ceci nécessite d'effectuer un volume considérable de mesures. Il faudra notamment des moyens de contrôler la température, l'intensité du courant, la tension, la puissance, les changements de phase, la pression d'huile, d'analyser le gaz et l'huile. Ces valeurs doivent être mesurées en permanence, non seulement pour savoir ce qu'il se passe à chaque instant mais également pour connaître l'état d'une infrastructure et les possibilités d'action afin de pour pouvoir prendre une décision éclairée, en cas de surcharge par exemple. Une utilisation accrue de l'intelligence artificielle, plus de transfert de données et d'interaction seront nécessaires pour faire face à l'augmentation des flux de données qui vont atteindre des volumes et des vitesses de transfert extrêmement importants. L'intelligence artificielle calcule plus rapidement que les humains. Lorsqu'il faut identifier un déséquilibre dans un système, elle est au moins 50 % plus rapide. La transformation numérique et l'automatisation améliorent la qualité de l'approvisionnement, ; toutefois, elles introduisent de nouveaux risques liés à la cybersécurité et à la résilience numérique.

Mme Berlijn rappelle que le défi majeur posé par les réseaux d'énergie durables de demain réside dans les quantités colossales de mesures précises et fiables qu'ils nécessitent. Elle conclut en affirmant que la création d'une planète soutenable est possible. Un système d'énergie neutre en carbone, durable et numérique, adossé à un réseau électrique numérique, en sera l'une des fondations. Cette transition est faisable et elle n'est pas si coûteuse. La transition énergétique se renforce d'elle-même pour des raisons économiques et de soutenabilité. L'investissement dans un système énergétique durable et numérique créera des emplois, réduira les coûts de production et sera à l'origine d'une économie soutenable. Créer cette économie est possible, mais ne peut être accompli sans l'aide des mesures. En somme, ce système est soutenable, techniquement atteignable et mesurable.

Le président remercie Mme Berlijn et remarque que le monde entier souhaite emprunter la route de la neutralité carbone. La présentation a bien montré que pouvoir emprunter cette route dépend du contrôle que l'on parvient à exercer. Le système de contrôle lui-même reposera sur le déploiement massif de systèmes de mesure, ce qui entraînera une consommation élevée d'énergie. Le président demande comment il est possible d'établir la soutenabilité du système.

Mme Berlijn répond que, du point de vue technique, il aurait bien mieux valu que l'électricité n'ait jamais été dérégulée. Bien que les infrastructures aient été utilisées de manière plus optimale qu'auparavant, l'augmentation constante de la demande d'électricité n'a pas été prise en considération. S'en sont suivis près de 20 ans sans qu'une ligne à haute tension ne soit construite dans de nombreux pays du monde. Aujourd'hui, la situation exige de rattraper le retard en termes de construction d'infrastructures mais reste entravée par la disparition des entreprises et de leurs compétences. En plus de ces nouvelles constructions, les infrastructures actuelles doivent être mieux exploitées. Pour parvenir à une transition verte, il s'agira de mieux utiliser les infrastructures existantes pour pallier le temps nécessaire pour en construire de nouvelles. Une ligne à haute tension demande 7 ans de travaux en Norvège, 25 ans en Suède. Les délais sont compris entre 7 et 25 ans dans de nombreux pays du monde. De nombreux défis doivent être relevés pour atteindre l'objectif à 30 ans en matière de climat, les processus démocratiques en font partie. Tout le monde veut une planète verte mais personne ne souhaite avoir une ligne à haute tension à proximité de son habitation : c'est une difficulté qu'il faudra résoudre. Les ingénieurs et les scientifiques doivent trouver des solutions à ces problèmes. Mme Berlijn rappelle que le travail effectué par la communauté de la métrologie est d'une importance cruciale : en effet, les mesures de temps sont essentielles au fonctionnement des réseaux d'énergie soutenables de demain, qui bénéficieront d'une exactitude de mesure de l'ordre de 10^{-18} secondes. Une plus grande exactitude améliorera l'efficacité de l'infrastructure actuelle et réduira la consommation d'électricité. Mme Berlijn espère que les éléments de sa présentation permettront d'apporter un peu de motivation à ce projet.

48. Rapport du président du CCEM

M. Gert Rietveld, président du Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), présente son rapport sur les activités du CCEM depuis la 26e réunion de la CGPM (2018).

Résumé du rapport du CCEM

Le CCEM couvre un très vaste domaine de la métrologie avec de nombreuses unités dérivées réalisables sur une gamme importante de valeurs et sur un grand domaine de fréquences. Jusqu'en 2018, le CCEM a consacré une part considérable de son travail au suivi de développement des balances de Kibble, en tant que dispositifs permettant la réalisation du kilogramme par une méthode électrique, afin de préparer la révision du SI. Depuis la 26e réunion de la CGPM, le CCEM s'est attaché à promouvoir le SI révisé et à s'assurer que ce dernier était correctement mis en œuvre, à partir du 20 mai 2019, au sein de la communauté de l'électromagnétisme. Le CCEM se réjouit de noter que les faibles changements d'amplitude causés par la mise en œuvre du SI révisé lors de la réalisation du volt et de l'ohm (ainsi que pour les grandeurs dérivées associées) n'ont pas généré de problème pour l'industrie.

En 2020, la stratégie du CCEM a été totalement révisée, établissant de nouvelles priorités pour l'avenir. Dans le domaine des mesures électriques, il sera ainsi nécessaire de relever les défis liés à l'émergence de nouvelles technologies, telles que les réseaux d'électricité intelligents incluant la production d'énergie renouvelables, les communications à haute fréquence, les véhicules électriques et les réseaux de capteurs. Afin d'agir plus efficacement concernant les défis métrologiques mondiaux, le CCEM a organisé des ateliers auxquels ont participé des invités de haut niveau du monde de l'industrie. La promotion du renforcement des capacités et des interactions avec l'industrie s'est appuyée sur le lancement d'une série de webinaires expliquant la pertinence de la métrologie de l'électricité et du magnétisme à la communauté élargie des parties prenantes du CCEM.

Des mesures ont été prises afin d'augmenter l'impact et l'efficacité du CIPM MRA dans le domaine de l'électromagnétisme, notamment en soutenant le BIPM concernant le développement et la mise en œuvre de la KCDB 2.0, en planifiant de manière plus stratégique les comparaisons, et en mettant en place un processus plus efficace d'examen des CMCs. Le BIPM a continué à étayer la comparabilité mondiale des mesures dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, principalement par son programme de comparaisons clés en continu.

Domaine de compétence du CCEM

Le CCEM a pour responsabilité de conseiller le CIPM sur tous les sujets se rapportant aux étalons de mesure dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, ainsi que sur les activités relatives à l'électricité et au magnétisme du programme de travail du Département de la métrologie en physique du BIPM.

L'électricité est omniprésente dans notre vie quotidienne et la métrologie électrique couvre un vaste domaine qui implique de nombreuses grandeurs et requiert de nombreux étalons de mesure d'unités dérivées. Il s'agit par exemple de mesurer une tension, un courant, une résistance, une capacité, une inductance, une puissance, un rapport de transformation, un transfert courant continu/courant alternatif, l'intensité d'un champ électrique ou magnétique, des facteurs d'antennes, des paramètres de répartition des radiofréquences (paramètres S). Dans de nombreux cas, ces grandeurs couvrent un très large intervalle de valeurs (des nanovolts aux mégavolts par exemple) et de fréquences (depuis le courant continu jusqu'aux radiofréquences), et nécessitent l'utilisation de différentes techniques selon l'intervalle sur lequel elles sont mesurées.

En raison des technologies très différentes requises dans les domaines des basses fréquences et des radiofréquences, le travail technique du CCEM est pris en charge par deux groupes de travail distincts : celui sur les basses fréquences et celui sur les radiofréquences. Un troisième Groupe de travail sur la coordination des organisations régionales de métrologie se charge de la mise en œuvre effective et efficace du CIPM MRA au sein de la communauté de l'électricité et du magnétisme, ce qui constitue une tâche particulièrement importante étant donné la grande diversité des CMCs en métrologie de l'électromagnétisme.

Stratégie

En 2019-2020, la stratégie du CCEM a été intégralement révisée puis approuvée par ses membres. À partir des conclusions de l'atelier sur les futurs défis de la métrologie électrique organisé par le CCEM en 2017 et des discussions qui ont suivi, la stratégie du CCEM établit de nouvelles priorités pour l'avenir. Le CCEM examine notamment, dans le domaine des mesures électriques, les futurs défis liés au développement de nouvelles technologies, telles que les réseaux d'électricité intelligents incluant des sources d'énergie renouvelables, les communications à haute fréquence, les véhicules électriques et les réseaux de capteurs. Les phénomènes quantiques fondamentaux sont à l'origine de l'extraordinaire exactitude que peuvent atteindre les mesures électriques et le soutien apporté par le CCEM à la mise au point de technologies quantiques innovantes continuera à entraîner des effets considérables sur la métrologie électrique. L'omniprésence des applications de l'électricité et des mesures électriques, dont résultent un grand nombre de grandeurs électriques mesurées sur de larges gammes de valeurs et de fréquences, allant du courant continu au GHz, représente un défi pour l'ensemble de la communauté du CCEM.

Le CCEM a pour objectif d'offrir une direction et une vision aux laboratoires nationaux de métrologie et aux laboratoires désignés afin d'éclairer leurs décisions en matière d'activités métrologiques et de recherche. Ainsi, le CCEM encourage l'échange d'informations par l'intermédiaire de présentations scientifiques et d'ateliers sur les technologies émergentes, avec l'intervention d'industriels invités de haut niveau. Une série de webinaires expliquant la pertinence de la métrologie de l'électricité et du

magnétisme à la communauté élargie des parties prenantes a été lancée afin d'améliorer le renforcement des capacités et les interactions avec l'industrie.

Le CCEM soutient la comparabilité mondiale des mesures par la mise en œuvre du CIPM MRA en organisant des comparaisons clés et en coordonnant les comparaisons clés et supplémentaires menées par les organisations régionales de métrologie. Le CCEM maintient une liste exhaustive des catégories de services dans lesquelles des CMCs peuvent être déclarées et cherche de nouveaux moyens d'améliorer son efficacité concernant l'organisation de comparaisons et l'examen des CMCs.

La supervision du programme de travail des laboratoires d'électricité du BIPM représente une part importante du travail du CCEM. Les services de comparaison du BIPM font partie intégrante des comparaisons du CCEM et permettent aux laboratoires nationaux de métrologie de démontrer de façon unique leurs aptitudes de mesure aux meilleurs niveaux d'incertitude possibles. Les services d'étalonnage du BIPM permettent aux laboratoires nationaux de métrologie qui ne disposent pas de leurs propres réalisations primaires d'assurer la traçabilité de leurs mesures.

Activités et réalisations depuis la dernière réunion de la CGPM

Principales activités et réalisations

Après avoir consacré les années qui ont précédé la mise en place du SI révisé à la mise au point des méthodes électriques de réalisation du kilogramme (balances de Kibble), le travail de recherche se concentre désormais sur le soutien à apporter à la communauté du CCM afin de faire progresser la mise en œuvre des balances de Kibble pour la réalisation du kilogramme et afin d'étendre l'utilisation de ces balances (versions simplifiées) à un plus large intervalle de masses. Le CCEM se réjouit de noter que les faibles changements d'amplitude causés par la mise en œuvre du SI révisé lors de la réalisation du volt et de l'ohm (ainsi que pour les grandeurs dérivées associées) n'ont pas généré de problème dans l'industrie, ni pour les parties prenantes de la communauté élargie du CCEM. Du fait de ce succès, les deux groupes de travail concernés, le Groupe de travail sur les projets de modification au SI et celui sur l'utilisation de mesures électriques pour contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme, ont été dissous après avoir salué l'excellent travail effectués par leurs présidents respectifs, M. Ian Robinson et M. Barry Wood, ainsi que M. Brian Kibble.

Par ailleurs, du fait de ses compétences en matière de mesures de faibles courants électriques, le CCEM a commencé à apporter son aide au CCRI, l'objectif étant de donner des conseils quant à la mise en œuvre de nouvelles technologies de mesure des faibles courants électriques dans les chambres d'ionisation utilisées pour la mesure d'activité des radionucléides. Un groupe de travail commun au CCEM et au CCRI composé de 18 experts prépare un guide de bonnes pratiques destiné à améliorer la traçabilité en métrologie des radionucléides et permettre une éventuelle réduction du nombre de cellules radioactives scellées nécessaires pour vérifier la linéarité sur un domaine de mesure spécifique.

Une version entièrement révisée de la stratégie du CCEM a été élaborée par un groupe composé du président du CCEM, de son secrétaire exécutif et des présidents des groupes de travail, en se fondant sur les conclusions de l'atelier sur les futurs défis de la métrologie électrique organisé avec succès par le CCEM en 2017 et sur les discussions qui en ont suivi. Cette stratégie, qui définit la direction et les priorités du CCEM pour la décennie à venir, a été examinée et adoptée par le CCEM au cours de sa 32e réunion en avril 2021.

L'un des principaux objectifs du CCEM est d'offrir une direction et une vision aux laboratoires nationaux de métrologie et aux laboratoires désignés afin d'éclairer leurs décisions en matière d'activités scientifiques et de recherche. Une part importante des réunions du CCEM est ainsi consacrée aux présentations scientifiques qui donnent un aperçu de l'état de l'art dans certains domaines de l'électromagnétisme. Par ailleurs, étant donné le succès du premier atelier sur la stratégie de 2017, un atelier scientifique sur la métrologie des radiofréquences et des micro-ondes a été organisé en

mars 2019, parallèlement à la 31e réunion du CCEM. Au cours de cet atelier, des intervenants de l'industrie, des universités et des laboratoires nationaux de métrologie ont donné une vue d'ensemble des défis actuels en métrologie des radiofréquences et des micro-ondes concernant, entre autres, les communications sans fil *mmWave*, la mise en œuvre des réseaux 5G, et la caractérisation radiofréquences sur wafer des circuits intégrés pour la téléphonie mobile.

Afin d'améliorer le renforcement des capacités et les interactions avec l'industrie, une série de webinaires a été lancée afin d'expliquer la pertinence de la métrologie de l'électricité et du magnétisme à la communauté élargie des parties prenantes du CCEM. Ces webinaires du CCEM sont destinés à promouvoir le partage des connaissances au sein de la communauté élargie du CCEM, non seulement concernant les dernières évolutions mais également les fondamentaux. Les webinaires, qui comportent une introduction au sujet traité, sont conçus pour être plus pédagogiques que les interventions et présentations scientifiques. Le premier webinaire a permis de présenter de façon synthétique la stratégie du CCEM et le programme de travail du BIPM et a rassemblé plus d'une centaine de participants de toutes les régions du monde. Les webinaires sont disponibles sur la chaîne YouTube du BIPM.

La mise en œuvre efficace et effective du CIPM MRA est un sujet récurrent du programme de travail du CCEM et de ses groupes de travail, en particulier celui sur la coordination des organisations régionales de métrologie. Le CCEM a ainsi apporté un soutien important au BIPM concernant la préparation et la mise en œuvre de la KCDB 2.0. Le lancement en octobre 2019 de la plateforme internet de la KCDB 2.0 a permis d'améliorer de façon considérable le processus de soumission et d'examen des CMCs, ce qui est particulièrement important pour la communauté du CCEM qui compte plus de 4 000 entrées dans la KCDB(y compris des matrices complexes), réparties dans plus de 190 catégories de services.

Les résultats de comparaisons clés constituent la base technique de la majorité des CMCs déclarées. Après une première série de comparaisons clés réalisée à la suite du lancement du CIPM MRA, un second cycle est planifié et mis en œuvre de manière stratégique. Le programme de comparaisons clés vise à optimiser la charge de travail et à assoir, à l'échelle internationale, la confiance dans la traçabilité des mesures des grandeurs électromagnétiques. Dans le cas de certaines comparaisons clés, plusieurs laboratoires nationaux de métrologie se partagent la charge de travail liée à la coordination de la comparaison. Le BIPM a réalisé la première comparaison du CCEM selon un schéma en étoile où tous les laboratoires nationaux de métrologie participants envoient leur étalon voyageur au BIPM au même moment. Cette approche requiert un travail conséquent du BIPM, qui constitue le laboratoire au centre de l'étoile, mais elle a permis de terminer cette comparaison en 20 mois. En raison de cet atout majeur, l'approche du schéma en étoile sera adoptée autant que possible pour les futures comparaisons du CCEM.

Défis et difficultés

La pandémie de Covid-19 a représenté un défi de taille pour la communauté du CCEM car elle a limité les opportunités d'échange d'informations et de débats approfondis au cours des réunions en personne du CCEM ou de ses ateliers associés (hautement appréciés). Dans le même temps, l'utilisation accrue des plateformes de réunion en ligne a facilité les interactions au sein des groupes de travail du CCEM. La pandémie a également conduit à la création de webinaires du CCEM qui ont permis d'étendre la portée du CCEM à la communauté élargie des parties prenantes de l'électromagnétisme, notamment les organismes de normalisation et l'industrie.

Un autre défi est de s'assurer de l'avancée suffisante des comparaisons clés. Bien que ce point ait déjà attiré l'attention dans le passé – en raison, par exemple, de problèmes de douanes ou de difficultés techniques rencontrées avec les étalons voyageurs – la pandémie a eu un impact supplémentaire sur l'avancement de plusieurs comparaisons clés du CCEM, entraînant des retards pouvant aller jusqu'à plus d'un an. Le recours plus fréquent au schéma en étoile devrait améliorer l'efficacité des futures comparaisons et en réduire la durée totale.

Perspectives à court et long terme

Dans les années à venir, le CCEM s'attachera à mettre en œuvre sa stratégie révisée, à promouvoir la métrologie électrique et la comparabilité mondiale des mesures, ainsi qu'à encourager une plus grande implication des parties prenantes. Ce dernier point reposera sur l'organisation d'ateliers, l'expansion du programme de webinaires, et le renforcement des liens avec les autres organisations internationales ainsi qu'avec le secteur de l'électromagnétisme au sens large afin, par exemple, de développer des exercices de prévision.

La mise en œuvre efficace du CIPM MRA fera l'objet d'une attention constante ; l'accent sera notamment mis sur l'amélioration du temps total nécessaire pour effectuer des comparaisons clés. Le programme du BIPM jouera un rôle important dans le soutien apporté à la communauté du CCEM. De nouveaux services du BIPM seront proposés à cette dernière dans les années à venir : il s'agira, par exemple, d'assurer la traçabilité des signaux en courant alternatif reposant sur l'utilisation des étalons quantiques de tension, ou d'améliorer la traçabilité des mesures d'impédance à l'aide de l'étalon calculable de capacité et de l'effet Hall quantique (AC) à base de graphène.

À long terme, le CCEM devrait être impliqué de façon croissante dans les travaux qui permettront de relever les principaux défis scientifiques et technologiques de la métrologie, concernant des sujets mondiaux tels que la transition énergétique, la plus large mise en œuvre des étalons quantiques dans l'industrie, ou encore l'application large et omniprésente de l'électricité et des mesures électriques dans nos sociétés.

Données sur le CCEM

CCEM établi en 1927 (sous le nom de CCE, Comité consultatif d'électricité)

Président :	G. Rietveld
Secrétaire exécutif	M. Stock
Composition :	26 membres et 2 observateurs
Liste des membres et des observateurs :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccem/members
Réunions depuis la dernière CGPM :	28-29 mars 2019, 14-15 avril 2021
Rapports complets des réunions :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccem/publications
Trois Groupes de travail :	https://www.bipm.org/fr/committees/cc/ccem

- Coordination des organisations régionales de métrologie
- Grandeurs aux basses fréquences
- Grandeurs aux radiofréquences

Activité en matière de comparaisons	Terminée(s)	En cours	Programmée(s)
Comparaisons clés du CCEM (et comparaisons supplémentaires)	50	7	7
Comparaisons du BIPM	1	9 (en continu)	9 (en continu)
Études pilotes du CCEM	0	1	2
CMCs	4642 CMCs dans 194 catégories de service publiées dans la KCDB		

Le président remercie M. Rietveld et demande s'il y a des questions.

M. Laiz (Argentine) fait référence à la présentation invitée sur les réseaux d'énergie durables au cours de laquelle il a été expliqué que ces nouveaux réseaux nécessitent des mesures synchrones, rapides et déployables à grande échelle. La CGPM doit adopter une résolution visant à disposer d'une unique échelle de temps et à mettre fin aux différentes échelles présentant des différences de temps. Il demande à M. Rietveld de donner plus d'éléments sur cette question et sur son importance pour les réseaux électriques.

M. Rietveld répond que cette question est cruciale. Comme Mme Berlijn, il rappelle que la stabilité est l'un des aspects clés du réseau électrique. Maintenir la stabilité du réseau nécessite une mesure essentielle, réalisable à l'aide de deux mesures synchrones à deux endroits différents du réseau. Si l'une de ces mesures ne tenait pas compte correctement de la seconde intercalaire, cela entraînerait une panne de courant généralisée. La seconde intercalaire doit être correctement mise en œuvre dans tous les appareils numériques : sinon, dès que ces derniers commencent à être utilisés, des problèmes peuvent apparaître sur le réseau et entraîner des conséquences considérables sur la société. L'analyse d'une importante coupure de réseau survenue au nord des États-Unis et au Canada il y a vingt ans a révélé que la panne était due au fait que la salle de contrôle n'avait pas effectué suffisamment de mesures. La synchronisation joue un rôle clé. La précision requise est de l'ordre des microsecondes, ce qui semble facile à atteindre pour la communauté du temps et des fréquences ; toutefois, obtenir des données justes et synchrones tout le long du réseau représente un défi. Cet objectif nécessite une coopération entre la communauté de l'électricité et la communauté du temps et des fréquences, la précision temporelle étant absolument cruciale. Il est indispensable d'abandonner la seconde intercalaire pour cette raison précise.

49. Présentation du Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 »

M. Louw, président du CIPM, annonce qu'il ne présentera pas le Projet de résolution V dans sa totalité étant donné que la dotation a fait l'objet de nombreuses discussions au cours de la Conférence. Il rappelle que le CIPM a présenté le travail réalisé par le directeur et le personnel du BIPM, ainsi que par les Comités consultatifs. Les représentants des États Membres ont affirmé leur soutien vis-à-vis de la dotation proposée et ont fait des observations sur la manière d'améliorer les systèmes du BIPM. M. Louw note que ces contributions sont très appréciées et garantit que le CIPM nouvellement élu s'appuiera sur ces éléments. Le CIPM a souligné le renforcement et la modernisation des structures de gouvernance depuis 2018 : cette démarche sera appliquée à l'échelle de l'organisation avec la rédaction de « by-laws » qui seront soumis à la CGPM. M. Louw remercie les représentants des États Membres et le Groupe de travail *ad hoc* pour leurs contributions sur ces questions. M. Louw présume que toutes les questions concernant le programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027 ont trouvé réponse. La parole est ensuite donnée au président de la CGPM qui demande aux délégués s'ils souhaitent faire des déclarations ou requièrent des clarifications, ce qui n'est pas le cas.

50. Vote du Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 »

M. Usuda, secrétaire du CIPM, rappelle aux délégués qu'une procédure spéciale régissant la conduite de la réunion a été adoptée au début de celle-ci. Il présente les dispositions 10 à 13 de la procédure relatives à l'adoption des résolutions et des décisions, telles que prévues dans le « Document de travail de la CGPM

(Octobre 2022) ». Concernant le vote des projets de résolution A à F, il sera demandé à chaque délégation, qu'elle participe sur site ou en ligne, d'indiquer si elle approuve la résolution, la rejette ou s'abstient. M. Usuda ajoute qu'il assistera le président de la CGPM lors des votes et s'attachera en particulier à vérifier les votes des participants en ligne afin qu'aucune voix ne soit omise. Le vote du Projet de résolution V se fera par appel nominal en raison de l'importance de la résolution.

Par ailleurs, M. Usuda présente la procédure d'élection du CIPM et de la Commission pour l'élection du CIPM, en se référant à la disposition 17 de la procédure spéciale dans le « Document de travail de la CGPM (Octobre 2022) ». Il souligne que seuls les délégués présents en personne auront pouvoir de voter lors de ces élections. Des bulletins de vote distincts pour l'élection du CIPM et pour celle de la Commission pour l'élection du CIPM seront donnés aux délégués et le dépouillement des résultats de chaque élection sera effectué par un service tiers de vote indépendant.

Le président remercie M. Usuda et débute le vote par appel nominal au sujet du Projet de résolution V.

Le Projet de résolution V « Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027 » est adopté comme Résolution 7. Au total, 40 des 64 États Membres ont voté en faveur du Projet de résolution V. Onze se sont abstenus : l'Autriche, le Bélarus, le Canada, le Costa Rica, l'Égypte, le Mexique, le Monténégro, le Maroc, la Fédération de Russie, la Tunisie et les États-Unis d'Amérique. Quatorze États Membres étaient absents lors du vote : la Bulgarie, le Chili, la Colombie, le Danemark, l'Équateur, la Grèce, la Hongrie, la République islamique d'Iran, l'Irlande, Israël, le Pakistan, la Serbie, l'Ukraine et l'Uruguay. Il n'y a pas eu de vote contre.

Mme Mcdonald (Canada) observe que la délégation canadienne s'inquiète du fait que les délégués présents dans la salle n'ont pu voir ou entendre les délégués en ligne voter, même s'il a été possible de voir certains commentaires en ligne. Le directeur du BIPM précise qu'un enregistrement de la fonction « chat » du système de réunion en ligne pourra être mis à disposition pour consultation, si besoin

51. Ouverture des votes pour l'élection du CIPM et de la Commission pour l'élection du CIPM

M. Gunn, président de la Commission pour l'élection du CIPM, rappelle que la méthode actuelle d'élection du CIPM a été établie lors de la 25e réunion de la CGPM (2014) et que les délégués de la CGPM ont été informés que le CIPM nouvellement élu rédigera des « by-laws » pour l'organisation. M. Gunn espère que la procédure d'élection du CIPM sera intégrée aux by-laws et soumise à l'approbation de la CGPM lors de sa 28e réunion.

M. Gunn précise qu'au total, 27 candidatures pour l'élection du CIPM ont été reçues à la suite de l'appel à candidatures envoyé aux États Membres. Dans deux cas, le dossier de candidature s'est avéré insuffisant pour sélectionner le candidat concerné donc 25 candidats répondent aux critères fixés. Conformément à la procédure, le CIPM a examiné les candidatures et a soumis une recommandation à la Commission pour l'élection du CIPM. Lors de plusieurs réunions en ligne, la Commission a étudié les candidatures en fonction des critères fixés dans la procédure.

La Commission a ainsi sélectionné les candidats qui formeraient selon elle un CIPM équilibré et représentatif pour les quatre prochaines années. Afin de parvenir à un consensus pour la présente élection, et du fait de la situation géopolitique actuelle, la Commission soumet aux États Membres une liste de 19 candidats recommandés, ainsi qu'une liste regroupant l'ensemble des candidats répondant aux critères.

M. Gunn fait part aux délégués de la CGPM d'une information récente. La Commission pour l'élection du CIPM a été informée le 17 novembre par une lettre officielle de l'ambassade d'Ukraine que le candidat ukrainien ne dispose pas du soutien de son gouvernement dans le cadre de l'élection du CIPM. Il n'est pas exigé dans la Convention du Mètre de bénéficier d'un tel soutien, car les membres du CIPM ne sont pas élus en tant que représentants de leur État, mais le document « Critères et procédure pour l'élection du CIPM » approuvé par le CIPM mentionne un tel critère. C'est pourquoi cette information est transmise aux États Membres afin qu'ils puissent en tenir compte lors de leur vote.

M. Gunn explique que l'élection du CIPM s'effectuera au scrutin secret. Le bulletin de vote contient le nom de 25 candidats et chaque État Membre peut voter pour 18 candidats maximum parmi les noms inscrits sur le bulletin. Il est possible de voter pour moins de 18 membres mais tout vote comptant plus de 18 noms sera déclaré nul.

M. Gunn ajoute que l'élection du CIPM sera suivie par celle visant à renouveler la Commission pour l'élection du CIPM. Les délégués éliront neuf personnes parmi les onze candidats. L'élection de la Commission ne fait l'objet d'aucune recommandation particulière.

Des scrutateurs indépendants ont été commissionnés pour effectuer le décompte des votes.

Il est convenu, du fait de l'information reçue tardivement concernant le candidat ukrainien, que les délégués disposeraient de plus de temps pour remplir leurs bulletins de vote pour l'élection du CIPM et pour celle de la Commission pour l'élection du CIPM, et que les bulletins remplis seraient déposés dans les urnes dans un délai donné, sous la supervision des scrutateurs indépendants.

52. Vote des projets de résolution A, B et C

Projet de résolution A

M. Louw, président du CIPM, rappelle que le Projet de résolution A « Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie »
est une première étape vers l'élaboration d'une stratégie du CIPM à compter de 2030. Il souligne que le texte de ce projet de résolution a été mis à disposition des délégués début 2022. Il demande s'il est nécessaire d'apporter des clarifications concernant le projet de résolution mais tel n'est pas le cas.

Le président de la CGPM demande aux délégués présents dans la salle et en ligne de lever la main s'ils sont favorables au Projet de résolution A : ce dernier est adopté à l'unanimité, sans abstention, comme Résolution 1 (2022) « Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie ».

Projet de résolution B

M. Louw présente les principaux éléments du Projet de résolution B « Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités ».

Le président de la CGPM demande aux délégués présents dans la salle et en ligne de lever la main s'ils sont favorables au Projet de résolution B : ce dernier est adopté à l'unanimité, sans abstention, comme Résolution 2 (2022) « Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités ».

Projet de résolution C

M. Louw présente le Projet de résolution C « Sur l'extension de la liste des préfixes du SI », qui ne fait l'objet d'aucune question ni commentaire de la part des délégués.

Le président de la CGPM demande aux délégués présents dans la salle et en ligne de lever la main s'ils sont favorables au Projet de résolution B : ce dernier est adopté à l'unanimité, sans abstention, comme Résolution 3 (2022) « Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités ».

Le directeur observe qu'une version mise à jour de la 9e édition de la Brochure sur le SI, version 2.01, sera publiée dans le courant du mois de décembre 2022 afin d'intégrer les nouveaux préfixes adoptés et d'effectuer quelques corrections typographiques mineures.

Septième séance – 18 novembre 2022 (après-midi)

Le président de la CGPM souhaite la bienvenue aux délégués pour la septième séance.

53. Vote des projets de résolution D, E et F

Projet de résolution D

M. Louw, président du CIPM, rappelle que le Projet de résolution D « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC » a fait l'objet d'une présentation par N. Dimarcq, président du CCTF (voir section 40). M. Louw présente les principaux éléments du projet de résolution.

Le président de la CGPM demande aux délégués présents dans la salle et en ligne de lever la main s'ils sont favorables au Projet de résolution D. Le Projet de résolution D est adopté comme Résolution 4 (2022) « Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC », avec une abstention (Bélarus) et un vote contre (Fédération de Russie).

Le président de la CGPM observe que le résultat du vote montre clairement qu'une majorité est favorable à cette résolution. Il ajoute que ce qui fait débat n'est pas la substance même de la résolution mais plutôt le calendrier d'adoption des actions découlant de cette résolution. Le directeur précise qu'il revient au CIPM de procéder aux étapes suivantes et que le CIPM prendra en considération le vote, comme il le fait pour chaque scrutin, puis décidera des actions à mettre en place pour progresser sur ce sujet d'ici la prochaine Conférence. Le président du CIPM confirme que le Projet de résolution D a été adopté et que le CIPM tiendra compte des questions pratiques qui ont été soulevées.

Projet de résolution E

M. Louw indique que le projet de résolution E « Sur la future redéfinition de la seconde » a été présenté et a fait l'objet d'une discussion lors du point 40 de l'ordre du jour, puis il en expose les principaux éléments.

Le président de la CGPM demande aux délégués présents dans la salle et en ligne de lever la main s'ils sont favorables au Projet de résolution E : ce dernier est adopté à l'unanimité comme Résolution 5 (2022) « Sur la future redéfinition de la seconde ».

Projet de résolution F

M. Louw présente le Projet de résolution F « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre ».

Le président de la CGPM demande aux délégués présents dans la salle et en ligne de lever la main s'ils sont favorables au Projet de résolution F : ce dernier est adopté à l'unanimité comme Résolution 6 (2022) « Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre ».

54. Annonce des résultats de l'élection du CIPM et de celle de la Commission pour l'élection du CIPM

Le président de la CGPM demande à la scrutatrice indépendante, Mme Villate, d'annoncer les résultats de l'élection du CIPM. Les résultats sont comme suit :

Candidat	**Nationalité**	**Votes**
Richard, P.	suisse	41
Usuda, T.	japonaise	41
Laiz, H.	argentine	40
Louw, W.	sud-africaine	40
Rastello, M.L.	italienne	40
del Campo Maldonado, D.	espagnole	39
Dimarcq, N.	française	39
Olthoff, J.	américaine	39
Coleman, V.	australienne	39
Ullrich, J.	allemande	39
Park, S.-R.	sud-coréenne	38
Macdonald, G.	canadienne	36
Rietveld, G.	néerlandaise	36
Duan, Y.	chinoise	35
Janssen, J.-T.	britannique	35
Achanta, V.G.	indienne	34
Ripper Palmeira, G.	brésilienne	32
Neyezhmakov, P.	ukrainienne	21

M. Gunn, président de la Commission pour l'élection du CIPM, requiert une brève interruption de la séance car il souhaite se réunir avec les membres de la Commission afin d'examiner les résultats de l'élection.

Son Excellence M. Cozendey (Brésil) demande des clarifications car il considère le vote comme effectué. Il demande si le vote concernant l'élection du CIPM est clos et si la réunion de la Commission aura des implications sur le vote.

Il s'en suit une discussion entre les délégués de la CGPM au cours de laquelle le directeur du BIPM suggère de poursuivre la séance avec l'annonce des résultats de l'élection de la Commission pour l'élection du CIPM, puis d'apporter une réponse à la question posée par la délégation brésilienne.

Le président de la CGPM demande à la scrutatrice indépendante, Mme Villate, d'annoncer les résultats de l'élection de la Commission pour l'élection du CIPM. Les résultats sont comme suit :

Candidat	**Affiliation**	**Votes**
Kobata, T.	NMIJ/AIST (Japon)	44
Chambon, M.	LNE (France)	42
Gunn, R.	NPL (Royaume-Uni)	42
Saundry, C.	NIST (États-Unis d'Amérique)	42
Höll, A.	BMWK (Allemagne)	41

Candidat	**Affiliation**	**Votes**
Kang, C.-S.	KRISS (République de Corée)	40
Melanson, J.	NRC (Canada)	39
Xie, J.	AQSIC (Chine)	37
Alfaleh, I.	SASO-NMCC (Arabie saoudite)	23
Mikiel, M	GUM (Pologne)	23

Le directeur précise qu'en raison de l'égalité des votes concernant la neuvième position à la Commission pour l'élection du CIPM, un second tour doit être organisé avec seulement deux noms sur le bulletin de vote (Marcin Mikiel et Ismael Alfaleh). Après distribution des bulletins de vote, les délégués pourront voter, sous la supervision des scrutateurs, au cours d'une pause de 20 minutes.

La réunion reprend après 20 minutes de pause et M. Louw, président du CIPM, demande si le vote est terminé concernant le second tour. Après confirmation, il est demandé aux scrutateurs de commencer le décompte des votes. Au terme du décompte, la scrutatrice indépendante annonce qu'Ismael Alfaleh, SASO-NMCC (Arabie saoudite), est élu membre de la Commission pour l'élection du CIPM.

La discussion reprend sur la question de l'élection du CIPM. M. Gunn, président de la Commission pour l'élection du CIPM, informe les délégués que les membres de la Commission pour l'élection du CIPM ont pu échanger et examiner la lettre transmise par l'Ambassade d'Ukraine.

Il s'ensuit une discussion entre le président de la Commission pour l'élection du CIPM et les délégués au sujet des résultats de l'élection du CIPM précédemment annoncés, avec pour point principal la question de savoir si le candidat ukrainien bénéficie du soutien de son gouvernement.

Le président de la Commission pour l'élection du CIPM propose d'organiser une nouvelle élection. Les délégués de plusieurs États Membres s'y opposent, la majorité considérant que le résultat de l'élection des 18 membres du CIPM reflète la vision commune des États Parties à la Convention du Mètre qui ont voté. Par conséquent, le résultat du vote doit être maintenu.

Le président de la CGPM résume la discussion en soulignant qu'il existe une procédure clairement définie concernant l'élection du CIPM. Une liste de candidats a été établie, les délégués ont reçu toutes les informations nécessaires sur les candidats préalablement au vote, une élection a été organisée et les résultats doivent être considérés comme valides.

Une question demeure quant à ce que doit faire un candidat s'il n'a pas le soutien de son gouvernement. À l'heure actuelle, il n'y a pas lieu de voter ou de prendre une décision. Les résultats de l'élection sont maintenus et le seul changement possible concernant la composition du CIPM serait l'éventuelle démission d'un membre dans le futur.

55. Projets de célébration du 150e anniversaire de la Convention du Mètre le 20 mai 2025

M. Louw présente les projets de célébration du 150e anniversaire de la signature la Convention du Mètre qui aura lieu le 20 mai 2025. Il rappelle que la Convention du Mètre a été signée à Paris par dix-sept nations le 20 mai 1875 dans le but d'assurer l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique. L'objectif est de célébrer les accomplissements du BIPM au cours de 150 années de métrologie, de présenter une nouvelle vision et une nouvelle stratégie pour le BIPM à compter de

2030, et de promouvoir la métrologie auprès d'une audience la plus large possible. Ces événements pourraient notamment se tenir au siège de l'UNESCO à Paris et au Palais des Congrès de Versailles.

Les résolutions adoptées par la CGPM à sa 27e réunion, en particulier les Résolutions 1, 2 et 6, donnent mandat au CIPM pour élaborer une stratégie à compter de 2030 et pour proposer une nouvelle vision et une nouvelle mission pour le BIPM. Le CIPM proposera un nouveau modèle de participation aux activités de l'organisation et prendra des mesures pour moderniser davantage les méthodes de gouvernance. Ainsi, l'élaboration des propositions concernant une nouvelle vision, une nouvelle stratégie, et un nouveau modèle favorisant une plus large participation, ainsi que le processus de consultation se dérouleront en 2023 et 2024. Le CIPM présentera la nouvelle mission, la nouvelle vision et le modèle de participation plus large en mai 2025.

De mai 2025 à fin 2025, le CIPM prendra en considération les observations formulées au sujet des propositions de nouveaux modèles de participation puis il préparera des projets de résolution qui seront soumis à l'approbation de la CGPM en 2026. Si la CGPM adopte la nouvelle vision et la nouvelle mission, ainsi que les modèles de participation, ces projets pourront être pleinement mis en œuvre avant 2030.

Deux projets du CIPM seront lancés en juin 2023, en amont du 150e anniversaire. La stratégie du CIPM à compter de 2030 implique le développement d'une nouvelle vision et d'une nouvelle stratégie pour le BIPM et la métrologie mondiale, ainsi qu'une consultation sur ces sujets. Le travail consistera notamment à examiner des options pour élargir la participation aux activités du BIPM. Le CIPM lancera une consultation auprès de jeunes métrologistes afin de connaître la façon dont ils envisagent la métrologie à partir de 2050. Ce projet mondial qui vise à susciter et faciliter des discussions parmi des groupes de jeunes métrologistes est une proposition des organisations régionales de métrologie, l'objectif étant de connaître quelle est leur vision concernant le futur de la métrologie.

56. Questions diverses

Mme Macdonald (Canada) remercie le BIPM pour l'organisation de la conférence. Elle souligne les efforts considérables fournis par les membres du personnel du BIPM pendant plusieurs années avant la CGPM pour assurer le travail de préparation de la réunion. Cette réunion a été particulièrement compliquée et a comporté un certain nombre de défis en raison de son format hybride.

Le directeur du BIPM tient également à remercier le personnel du BIPM et les détachés impliqués dans la préparation de la réunion.

57. Clôture de la réunion

Le président de la CGPM clôt la conférence en soulignant qu'il est personnellement très heureux d'avoir présidé cette réunion, d'avoir eu l'opportunité de découvrir un monde inconnu et de découvrir la communauté de la métrologie et la façon dont elle fait progresser la science. Il a trouvé la réunion très instructive et intéressante.

M. Louw, au nom du CIPM, remercie M. Flandrin d'avoir assisté à la réunion et de l'avoir présidée avec efficacité.

Résolutions adoptées par la Conférence générale des poids et mesures lors de sa 27e réunion (2022)

Résolution 1	Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie	**206**
Résolution 2	Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités	**208**
Résolution 3	Sur l'extension de la liste des préfixes du SI	**210**
Résolution 4	Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC	**211**
Résolution 5	Sur la future redéfinition de la seconde	**213**
Résolution 6	Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre	**214**
Résolution 7	Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027	**216**

Résolution 1

Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 27e réunion,

rappelant

- la Résolution 2 adoptée par la CGPM à sa 23e réunion (2007) qui invite le Comité international des poids et mesures (CIPM) à présenter un rapport sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie aux prochaines réunions de la CGPM et à préparer des propositions d'activités à mettre en œuvre par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) au niveau international,
- la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 26e réunion (2018) sur la révision du Système international d'unités (SI) qui définit les sept unités de base à partir de la valeur numérique fixée de constantes choisies, ce qui ouvre de nouvelles perspectives à la réalisation des unités,
- la Résolution 3 adoptée par la CGPM à sa 26e réunion (2018) qui accueille favorablement le développement d'une vision stratégique à long terme qui, associée à un processus de planification consolidée, étaye le développement du Programme de travail du BIPM en consultation avec les États Membres,

notant

- le rôle essentiel que joue le Système international d'unités (SI) afin d'établir la confiance dans l'exactitude et la comparabilité au niveau mondial des mesures nécessaires pour le commerce international, l'industrie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la recherche scientifique,
- le rôle critique de la métrologie pour relever les défis mondiaux dans des domaines tels que le changement climatique et l'environnement, la santé et les sciences de la vie, la sécurité alimentaire, l'énergie, l'industrie de pointe, la transformation numérique et la lutte contre les pandémies mondiales,
- la nature de plus en plus multidisciplinaire des mesures en ce qui concerne les nouvelles technologies ou les technologies de rupture, et les nouvelles exigences vis-à-vis de la métrologie dans les domaines des technologies numériques, des réseaux de capteurs et du Big Data,

saluant le rapport du CIPM « *Evolving needs in metrology* » sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie,

encourage le CIPM

- à élaborer une vision à long terme qui veille à ce que le système mondial de mesures demeure pertinent et qu'il réponde de manière adéquate aux nouveaux défis métrologiques,
- à établir des groupes interdisciplinaires (« horizontaux ») qui relèveront ces nouveaux défis et qui compléteront l'actuelle structure (« verticale ») de ses Comités consultatifs, fondée sur les grandeurs,
- à marquer, le 20 mai 2025, le 150e anniversaire de la signature de la Convention du Mètre en présentant une nouvelle vision pour le BIPM qui s'appuie sur le rapport du CIPM sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie et qui se fonde sur un examen des réalisations du BIPM et des exigences futures concernant ses activités,

– à consulter de façon élargie sur la proposition qu'il formulera au sujet d'une nouvelle vision pour le BIPM qui sera présentée à la CGPM lors de sa 28e réunion (2026),

et invite les États Membres et les laboratoires nationaux de métrologie à contribuer au travail du CIPM visant à répondre à l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie et à définir une nouvelle vision pour le BIPM.

Résolution 2

Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 27e réunion,

considérant

- le fait que les gouvernements, l'industrie, le monde universitaire et la société civile œuvrent depuis de nombreuses années pour une transformation numérique globale et qu'ils sont ainsi amenés :
  - à établir des systèmes de collecte, d'agrégation, d'analyse et d'interprétation des données numériques,
  - à mettre en place des systèmes de capteurs en réseau pour diverses applications scientifiques et industrielles,
  - à partager des données à l'échelle locale, nationale, régionale et internationale,
- le rôle essentiel que joue le Système international d'unités (SI) afin d'établir la confiance dans l'exactitude et la comparabilité au niveau mondial des mesures nécessaires pour le commerce international, l'industrie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la recherche scientifique,

anticipant que

- maintenir et renforcer la confiance dans l'exactitude et la comparabilité au niveau mondial des mesures nécessitera d'élaborer une représentation numérique complète du SI qui comprendra des représentations numériques robustes, non ambiguës et exploitables par machine des unités, valeurs et incertitudes de mesure,
- réussir une telle transformation numérique globale requerra de collaborer avec un grand nombre de parties prenantes, telles que l'Organisation internationale de normalisation (ISO), la Commission électrotechnique internationale (IEC), l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), l'International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), le Comité sur les données scientifiques et technologiques (CODATA) du Conseil international des sciences, ainsi qu'avec d'autres communautés scientifiques, organismes de réglementation et organisations de l'infrastructure de la qualité,

salue

- les récents efforts visant à définir des principes d'orientation pour une transformation numérique de la métrologie,
- l'établissement d'une structure de gouvernance flexible et inclusive soutenant le développement et la mise en œuvre de cette transformation,

encourage

- le CIPM à continuer ses actions de promotion et de mobilisation afin de s'assurer que le rôle de la Convention du Mètre, en tant que fondement de la confiance vis-à-vis de la métrologie accepté au niveau international, s'ouvre à l'ère numérique,
- le CIPM à commencer à développer et promouvoir un « cadre numérique du SI » qui présentera notamment les caractéristiques suivantes :

- constituer une représentation numérique du SI acceptée au niveau mondial qui soit compatible et utilisable avec les normes et protocoles d'échange de données numériques, et qui conserve sa compatibilité avec les solutions non numériques existantes,
- faciliter l'utilisation des certificats numériques dans l'actuelle infrastructure robuste qui permet la reconnaissance et l'acceptation au niveau international des aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages,
- adopter les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable* - données trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables) pour les données et métadonnées métrologiques numériques, en s'assurant que les autres communautés reconnaissent l'importance critique de la traçabilité métrologique des données de mesure, cette dernière étant une condition préalable à l'instauration de la confiance,

invite

- les laboratoires nationaux de métrologie, les organisations régionales de métrologie ainsi que d'autres parties prenantes à maintenir et, si possible, à accroître leur actuel niveau d'engagement et de collaboration avec le CIPM afin de continuer à développer, promouvoir et mettre en œuvre le « cadre numérique du SI »,
- toutes les organisations partageant un intérêt ou des activités concernant l'infrastructure de la qualité – qui repose sur la métrologie, la normalisation, l'accréditation, l'évaluation de la conformité et la surveillance du marché – à envisager de participer à ce projet commun de transformation numérique afin de s'assurer que le « cadre numérique du SI » répond aux besoins de toutes les parties prenantes.

Résolution 3

Sur l’extension de la liste des préfixes du SI

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 27e réunion,

rappelant les décisions prises lors de ses précédentes réunions lorsqu’il a été considéré opportun d’étendre la liste des préfixes du SI, notamment la Résolution 12 (paragraphe 3) adoptée par la CGPM à sa 11e réunion (1960), la Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 12e réunion (1964), la Résolution 10 adoptée par la CGPM à sa 15e réunion (1975), et la Résolution 4 adoptée par la CGPM à sa 19e réunion (1991),

considérant

- le rôle essentiel que joue le Système international d’unités (SI) afin d’établir la confiance dans l’exactitude et la comparabilité au niveau mondial des mesures nécessaires pour le commerce international, l’industrie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l’environnement, les études sur l’évolution du climat, ainsi que la recherche scientifique,
- les avantages à encourager l’utilisation des unités du SI en mettant de nouveaux préfixes du SI à la disposition des communautés scientifiques qui dépendent de mesures qui ne sont pas couvertes par les préfixes existant actuellement,
- les besoins de la science des données, dans un futur proche, afin d’exprimer des quantités d’informations numériques d’un ordre de grandeur supérieur à 10^{24},
- l’importance de prendre une mesure en temps opportun afin d’éviter que des noms de préfixe non officiels ne soient adoptés *de facto* par d’autres communautés,

décide d’ajouter à la liste des préfixes du SI pour la formation des noms des multiples et sous-multiples des unités les préfixes suivants :

Facteur par lequel l’unité est multipliée	Préfixe	Symbole
10^{27}	ronna	R
10^{-27}	ronto	r
10^{30}	quetta	Q
10^{-30}	quecto	q

Résolution 4

Sur l’utilisation et l’évolution future de l’UTC

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 27e réunion,

rappelant que

- le Temps universel coordonné (UTC) est une échelle de temps produite par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) ayant la même marche que le Temps atomique international (TAI) mais différant du TAI par un nombre entier de secondes seulement,
- le décalage d’un nombre entier de secondes est dû au fait de maintenir l’accord entre l’UTC et l’échelle de temps qui est calculée à partir de l’angle de rotation de la Terre (UT1),
- lorsque la différence (UT1 - UTC), telle qu’observée par le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS), a une valeur prédite proche de 0,9 seconde, une seconde intercalaire est introduite selon la procédure décrite dans la Recommandation UIT-R TF.460-6 du Secteur des radiocommunications de l’Union internationale des télécommunications (UIT-R),

rappelant par ailleurs que la CGPM à sa 26e réunion (2018)

- a déclaré que l’UTC est l’unique échelle de temps recommandée comme référence internationale et qu’elle est à la base du temps civil dans la plupart des pays,
- a recommandé à toutes les organisations et unions concernées de travailler ensemble afin de parvenir à une compréhension commune des échelles de temps de référence, de leur réalisation et de leur dissémination, l’objectif étant d’examiner les limites actuelles de l’amplitude maximale d’UT1 - UTC afin de répondre aux besoins des communautés d’utilisateurs actuelles et à venir,

saluant la signature d’un protocole d’accord entre le BIPM et l’Union internationale des télécommunications (UIT) qui confirme que les deux organisations continueront à travailler en commun afin d’améliorer l’accès à l’UTC,

notant que

- la valeur maximale acceptée pour la différence (UT1 - UTC) fait l’objet de discussions depuis de nombreuses années car l’introduction de secondes intercalaires qui en découle crée des discontinuités qui risquent de provoquer de graves dysfonctionnements d’infrastructures numériques essentielles, telles que les systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS), les systèmes de télécommunication et ceux de transmission d’énergie,
- les opérateurs de réseaux numériques et systèmes GNSS ont développé et appliqué différentes méthodes d’introduction des secondes intercalaires qui ne suivent pas de normes convenues,
- la mise en œuvre de ces différentes méthodes non coordonnées menace la résilience des capacités de synchronisation qui étayent des infrastructures nationales critiques,
- l’utilisation de ces différentes méthodes génère par ailleurs de la confusion, ce qui compromet la reconnaissance de l’UTC comme unique échelle de temps de référence et remet en question le rôle des laboratoires nationaux de métrologie (et laboratoires désignés) comme sources de traçabilité aux étalons métrologiques nationaux et internationaux,
- les récentes observations de la vitesse de la rotation de la Terre indiquent qu’il pourrait être nécessaire d’introduire pour la première fois une seconde intercalaire négative, ce qui n’a jamais été envisagé ou testé,

– le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) a conduit une étude approfondie auprès d'institutions métrologiques, scientifiques et technologiques, ainsi qu'auprès d'autres parties prenantes, dont les réponses confirment la position selon laquelle des mesures doivent être prises afin de résoudre la question des discontinuités de l'UTC,

reconnaissant que l'utilisation de l'UTC comme unique échelle de temps de référence pour l'ensemble des applications, y compris les réseaux numériques avancés et les systèmes satellitaires, requiert de définir de façon claire et sans ambiguïté l'UTC comme une échelle de temps continue disposant d'une chaîne de traçabilité parfaitement comprise,

décide que la valeur maximale pour la différence (UT1 - UTC) sera augmentée au plus tard en 2035,

demande au CIPM de consulter l'UIT, ainsi que d'autres organisations qui pourraient être concernées par cette décision, afin de préparer les actions suivantes :

– proposer une valeur maximale pour la différence (UT1 - UTC) qui permettra d'assurer la continuité de l'UTC pendant au moins un siècle,
– préparer un plan de mise en œuvre d'ici 2035 au plus tard de la valeur maximale proposée pour la différence (UT1 - UTC),
– proposer une périodicité pour l'examen par la CGPM de la nouvelle valeur maximale après sa mise en œuvre afin que la CGPM garde le contrôle de l'applicabilité et de l'acceptabilité de la valeur appliquée,
– rédiger une résolution décrivant ces propositions qui sera soumise pour adoption par la CGPM à sa 28e réunion (2026),

encourage le BIPM à travailler avec les organisations concernées afin d'identifier la nécessité de mettre à jour les différents services qui disséminent la valeur de la différence (UT1 - UTC) et afin de vérifier que la nouvelle valeur maximale est correctement comprise et utilisée.

Résolution 5

Sur la future redéfinition de la seconde

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 27e réunion,

rappelant que

- la CGPM à sa 13e réunion (1967) a défini la seconde comme « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 »,
- la CGPM à sa 26e réunion (2018) a révisé les définitions des unités de base du SI, y compris en ce qui concerne la seconde qui est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{Cs}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1},

notant que

- des étalons de fréquence optiques fondés sur différentes espèces et transitions, dans de nombreux laboratoires nationaux de métrologie, ont dépassé l'exactitude pouvant être atteinte par l'actuelle mise en pratique de la définition de la seconde d'un facteur allant jusqu'à 100,
- la fiabilité et l'incertitude des comparaisons de temps et de fréquence s'améliorent de façon considérable,
- certains laboratoires ont démontré que des échelles de temps élaborées à partir d'un ou de plusieurs étalons de fréquence optiques ont le potentiel de présenter une exactitude plus élevée que l'échelle de temps fondée sur l'actuelle définition de la seconde,
- ces avancées permettront d'améliorer davantage la réalisation et la dissémination des échelles de temps, en particulier du Temps universel coordonné (UTC),

notant par ailleurs que le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), lors de ses travaux visant à répondre aux besoins actuels et futurs de la métrologie du temps,

- a réalisé une étude approfondie auprès d'institutions métrologiques, scientifiques et technologiques, ainsi qu'auprès d'autres parties prenantes, qui a confirmé l'intérêt à l'échelle mondiale que suscitent des services de temps et de fréquences rendus plus exacts par une nouvelle définition de la seconde,
- cherche à identifier la meilleure espèce candidate ou le meilleur ensemble d'espèces candidates qui pourrait servir de fondement à une nouvelle définition,
- a préparé une feuille de route décrivant les actions et le calendrier nécessaires pour pouvoir adopter une nouvelle définition de la seconde et a établi les critères et indicateurs appropriés afin de superviser les progrès accomplis en ce sens,

encourage le Comité international des poids et mesures (CIPM)

- à promouvoir combien il est important de réaliser les objectifs fixés dans la feuille de route pour la redéfinition de la seconde,
- à formuler des propositions lors de la 28e réunion de la CGPM (2026) afin de choisir l'espèce privilégiée, ou l'ensemble d'espèces, pour une redéfinition de la seconde et afin de définir les mesures suivantes qui devront être prises afin qu'une nouvelle définition de la seconde soit adoptée par la CGPM à sa 29e réunion (2030),

et **invite** les États Membres à soutenir les activités de recherche, ainsi que le développement d'infrastructures nationales et internationales, afin de pouvoir progresser vers l'adoption d'une nouvelle définition de la seconde.

Résolution 6

Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 27e réunion,

rappelant

- qu'en 1875 les Hautes Parties contractantes, désirant assurer l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique, ont résolu de conclure une Convention à cet effet (connue depuis sous le nom de Convention du Mètre) et avaient ainsi, dès le départ, l'ambition d'une participation universelle,
- qu'une telle ambition a été rappelée dans la Convention en 1921 par l'insertion de l'Article III, lequel prévoit que « [t]out État pourra adhérer à la […] Convention en notifiant son adhésion au Gouvernement français […] »,
- qu'il est important et pertinent de promouvoir et faciliter une plus large participation, tel que l'a souligné en particulier la CGPM dans les résolutions suivantes :
  - la Résolution 14 adoptée par la CGPM à sa 11e réunion (1960),
  - la Résolution 2 et la Résolution 3 adoptées par la CGPM à sa 21e réunion (1999),
  - la Résolution 3 et la Résolution 4 adoptées par la CGPM à sa 22e réunion (2003),
  - la Résolution 5, la Résolution 6 et la Résolution 7 adoptées par la CGPM à sa 23e réunion (2007),
  - la Résolution 4 et la Résolution 5 adoptées par la CGPM à sa 24e réunion (2011),
  - la Résolution 3 adoptée par la CGPM à sa 26e réunion (2018),

notant que

- à la suite de l'adoption des résolutions susmentionnées, un certain nombre d'actions ont été mises en œuvre par le Comité international des poids et mesures (CIPM) afin de faciliter une plus large participation,
- le nombre de participants a augmenté de façon remarquable, en particulier au cours des deux dernières décennies depuis le lancement du CIPM MRA, le nombre d'États adhérant à la Convention du Mètre passant de 48 en 1999 à 64,
- la création du statut d'Associé à la CGPM, qui permet aux États qui ne sont pas encore prêts à devenir Membres et aux Entités économiques de participer, a été un mécanisme efficace pour accroître l'implication d'États à la communauté métrologique internationale et constitue une première étape vers l'adhésion à la Convention du Mètre,
- le besoin pour chaque État d'accéder à une infrastructure de la qualité efficace permettra d'atteindre plus facilement les Objectifs de développement durables (ODD) adoptés par les Nations Unies dans le cadre du Programme de développement durable à l'horizon 2030,

s'engageant

- à renforcer davantage le rôle du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et à faciliter une participation plus large à ses activités, afin de parvenir à une adhésion durable et universelle à la Convention du Mètre,

saluant

- les efforts continus du personnel du BIPM afin de renforcer son efficacité et son efficience, ainsi que les efforts du CIPM, des États Membres, des organisations régionales de métrologie et de laboratoires nationaux de métrologie afin d'encourager et faciliter une plus large participation,
- le soutien apporté par d'autres organisations internationales aux pays en développement en vue d'établir l'infrastructure métrologique ainsi que celle plus large de la qualité,
- l'initiative annuelle conjointe du BIPM et de l'Organisation internationale de la métrologie légale (OIML) afin de célébrer la Journée mondiale de la métrologie, qui a joué un rôle important afin de mieux faire connaître les avantages de la participation aux activités des deux organisations intergouvernementales et à celles des organisations régionales de métrologie,

reconnaissant que

- un nombre considérable d'États ne participent pas encore aux activités du BIPM,
- le fait d'apporter des modifications à la structure des contributions et souscriptions, ainsi qu'aux droits de participation accordés, pourrait faciliter une participation universelle,
- de telles modifications doivent être équitables vis-à-vis des États Membres existants et doivent fournir une base solide à l'organisation intergouvernementale,

invite le CIPM

- à étudier les pratiques d'adhésion d'autres organisations internationales,
- à examiner comment l'Article III de la Convention du Mètre est actuellement appliqué et à présenter à la CGPM à sa 28e réunion comment cet article pourrait être mis en œuvre afin de faciliter une adhésion durable et universelle à la Convention du Mètre,
- à analyser les implications d'une participation plus large au programme de travail et aux services du BIPM,
- à proposer les mesures qui s'imposent afin de les soumettre pour examen à la CGPM à sa 28e réunion.

Résolution 7

Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures pour les années 2024 à 2027

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 27e réunion,

considérant

- l'importance croissante du travail du Bureau international des poids et mesures (BIPM), dans tous les États Membres, pour le commerce international, l'innovation dans le secteur industriel, la surveillance du changement climatique, la santé humaine et la médecine, l'alimentation et la médecine légale,
- le fait que le BIPM est reconnu comme l'organisation intergouvernementale scientifique experte dans le domaine de la métrologie, ainsi que la valeur ajoutée et l'optimisation des coûts que le travail du BIPM apporte aux États Membres sur les plans technique et économique,
- la façon dont le BIPM continue d'adopter les meilleures pratiques de gestion et d'améliorer l'efficacité de son fonctionnement,
- la Résolution 7 adoptée par la CGPM à sa 16e réunion (1979), établissant le principe de détermination de la dotation de base,

notant

- la situation financière mondiale actuelle et les contraintes financières auxquelles les États Membres continuent d'être soumis,
- les exigences auxquelles doit répondre le BIPM afin de développer des compétences pour mettre en œuvre la transformation numérique de la métrologie, l'objectif étant à la fois de faire évoluer ses propres services et de soutenir le travail du CIPM,

accueille favorablement

- le soutien de toutes sortes apporté au BIPM par les laboratoires nationaux de métrologie, en particulier par voie de détachement de membres de leur personnel auprès du BIPM, ainsi que le soutien concernant le programme du BIPM de renforcement des capacités et de transfert des connaissances,

décide que

- la dotation annuelle du BIPM, telle que définie à l'article 6 (1921) du Règlement annexé à la Convention du Mètre, sera fixée de façon à ce qu'elle corresponde, pour les États Parties à la Convention du Mètre au moment de la 27e réunion de la CGPM, à[1] :

13 161 218 euros en 2024
13 358 636 euros en 2025
13 559 016 euros en 2026
13 762 401 euros en 2027

[1] Le Costa Rica n'a pas été pas inclus dans le calcul de la dotation car le BIPM a été notifié de son accession après la réunion du CIPM de juin 2022.

encourage

– les États Membres, ainsi que les organisations internationales, les organismes privés et les fondations à continuer à apporter un soutien volontaire supplémentaire de toutes sortes afin de soutenir des activités spécifiques liées à la mission du BIPM, en particulier celles qui facilitent la participation aux activités du BIPM de pays qui ne disposent pas d'une infrastructure métrologique bien développée.

Annexe A – Convocation et Procédure spéciale

N.Réf : MM-CFA-2022-00401

Sèvres, 11 février 2022

Ambassades à Paris des États Parties à la Convention du Mètre
Président de l'Académie des sciences
Membres du CIPM

Convocation de la 27e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM)

En vertu de l'article 7 du Règlement annexé à la Convention du Mètre, nous tenons par la présente à vous informer que le Comité international des poids et mesures (CIPM) a décidé de convoquer la 27e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) du mardi 15 au vendredi 18 novembre 2022 au Palais des Congrès de Versailles, 10 rue de la Chancellerie, 78000 Versailles, Yvelines, France.

En vertu de l'article 4 de la Convention, la CGPM sera présidée par le Professeur Patrick Flandrin, président en exercice de l'Académie des sciences.

Conformément aux meilleures pratiques adoptées par d'autres organisations internationales, la réunion se tiendra dans un format « hybride » permettant à la fois une participation en personne et à distance. À cette fin, le CIPM propose que la CGPM, à sa 27e réunion, adopte une procédure spéciale régissant la conduite de la réunion. Cette procédure spéciale, jointe à la présente lettre, sera examinée au cours de la séance d'ouverture de la réunion de la CGPM. Nous saurions gré aux États Parties de bien vouloir indiquer au secrétaire du CIPM d'ici le 30 juin 2022 (par courriel à l'adresse cgpm@bipm.org) s'ils soutiennent l'adoption de la procédure spéciale proposée.

Une liste des projets de résolution proposés par le CIPM pour discussion lors de la réunion, ainsi qu'un ordre du jour provisoire, sont joints à cette lettre.

Les États Parties sont invités à présenter leurs propositions par voies officielles en respectant un délai de quatre (4) mois avant la réunion afin que ces propositions puissent être transmises aux autres États Parties, tel que prévu dans la Résolution 10 adoptée par la CGPM à sa 9e réunion (1948).

Les États Parties sont priés de communiquer au directeur du Bureau international des poids et mesures (BIPM) (par courriel à l'adresse cgpm@bipm.org) la composition de leur délégation, ainsi que les titres accréditant les délégués, au plus tard deux semaines avant l'ouverture de la 27e réunion.

Le programme détaillé de la réunion de la CGPM, ainsi que les documents y afférents, seront disponibles sur le site internet du BIPM qui sera mis à jour régulièrement au cours de la préparation de la réunion : https://www.bipm.org/fr/cgpm-2022.

Compte tenu de la situation sanitaire mondiale actuelle, nous organiserons deux séances d'information en ligne afin de tenir les participants informés des plans concernant la réunion de la CGPM. Le président du CIPM profitera également de ces deux séances pour présenter des propositions au sujet de la constitution d'un groupe de travail informel sur la dotation. Des informations à ce sujet seront envoyées par courriel.

Pour le Comité international des poids et mesures

Secrétaire du CIPM
Takashi Usuda

Président du CIPM
Wynand Louw

Annexe 1 Liste des projets de résolution de la 27e réunion de la CGPM

Annexe 2 Ordre du jour provisoire de la 27e réunion de la CGPM

Appendice Procédure spéciale régissant la conduite de la 27e réunion de la CGPM

Copie

Directeurs des laboratoires nationaux de métrologie des États Parties à la Convention du Mètre

Annexe 1

Liste des projets de résolution de la 27e réunion de la Conférence générale des poids et mesures

A. Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie

B. Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités

C. Sur l'extension de la liste des préfixes du SI

D. Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC

E. Sur la future redéfinition de la seconde

F. Sur l'adhésion universelle à la Convention du Mètre

V. Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures

Les projets de résolution sont disponibles sur le site internet du BIPM à l'adresse https://www.bipm.org/fr/cgpm-2022/documents.

Annexe 2

Ordre du jour provisoire de la 27e réunion de la Conférence générale des poids et mesures

Présentation des titres accréditant les délégués

1. Ouverture de la réunion
2. Discours de Son Excellence M. le Ministre de l'Europe et des Affaires étrangères de la République française
3. Réponse de M. le Président du Comité international des poids et mesures
4. Discours de M. le Président de l'Académie des sciences de Paris, Président de la CGPM
5. Désignation du Secrétaire de la CGPM
6. Établissement de la liste des délégués ayant pouvoir de voter
7. Approbation de l'ordre du jour
8. Procédure spéciale permettant une participation en ligne à la 27e réunion
9. Rapport de M. le Président du CIPM sur les travaux accomplis depuis la 26e réunion de la CGPM
10. Rapport de M. le Directeur du BIPM sur les travaux accomplis depuis la 26e réunion de la CGPM

L'ordre et le temps consacré aux points de l'ordre du jour ci-dessous sont indiqués dans le programme détaillé.

11. Présentations des représentants d'organisations intergouvernementales et d'organismes internationaux
12. Rapport sur les relations avec les organisations intergouvernementales et les organismes internationaux
13. Rapports des présidents des Comités Consultatifs
14. Sur le rapport préparé par le Comité international des poids et mesures sur l'évolution des besoins dans le domaine de la métrologie (Projet de résolution A)
15. Sur la transformation numérique mondiale et le Système international d'unités (Projet de résolution B)
16. Sur l'extension des préfixes du SI (Projet de résolution C)
17. Sur l'utilisation et l'évolution future de l'UTC (Projet de résolution D)
18. Sur la future redéfinition de la seconde (Projet de résolution E)
19. Sur l'adhésion universelle à la Convention du mètre (Projet de résolution F)
20. Rapport du président du Sous-comité du CIPM sur les finances
21. Programme de travail du BIPM proposé pour les années 2024 à 2027

22. Désignation des membres du Groupe de travail sur la dotation du BIPM
23. Sur la dotation du Bureau international des poids et mesures (Projet de résolution V)
24. Propositions des délégués
25. Votes des résolutions
26. Élection du CIPM
27. Questions diverses
28. Projets afin de célébrer, le 20 mai 2025, le 150e anniversaire de la signature de la Convention du Mètre
29. Clôture de la réunion

Appendice de la Convocation de la 27e réunion de la CGPM

Procédure spéciale régissant la conduite de la 27e réunion de la CGPM (ci-après dénommée « Procédure spéciale »)

I. OBJET

1. Compte tenu des restrictions de voyage sans précédent qui ont été mises en place en raison de la pandémie de COVID-19, il est très peu probable que l'ensemble des États Parties à la Convention du Mètre puissent être représentés en personne à la 27e réunion de la CGPM.

2. L'objet de la présente Procédure spéciale est de permettre que la 27e réunion de la CGPM se tienne en novembre 2022 dans un format hybride, permettant à la fois une participation en personne et à distance des représentants des États Parties, ainsi que des représentants des États et Entités économiques Associés à la CGPM et des observateurs invités.

3. Cette Procédure spéciale est exceptionnelle et ne constitue pas un amendement des dispositions de la Convention du Mètre et de son Règlement annexé.

4. D'autres organisations internationales siégeant en France ont eu recours à une procédure similaire permettant à leurs organes de gouvernance et assemblées générales de remplir leur fonction en dépit des restrictions de voyages.

II. CONDUITE DE LA RÉUNION

5. Tout sera mis en œuvre pour permettre la pleine participation des délégués de l'ensemble des États Parties. Outre la possibilité de participer à la réunion au Palais des Congrès à Versailles, une plateforme en ligne, facile à utiliser et sécurisée, sera mise en place pour les délégués qui ne pourront pas assister à la réunion en personne.

6. Le président de la 27e réunion de la CGPM expliquera les modalités de participation au début de chaque séance et prendra les mesures nécessaires afin de faciliter la participation en ligne en tenant compte des différents fuseaux horaires.

7. Afin de garantir une pleine participation, en personne ou à distance, le président invitera les délégués à demander la parole. Les États Parties souhaitant présenter leurs vues sur un point spécifique de l'ordre du jour pourront choisir de contacter le président ou le secrétaire de la CGPM en amont de la discussion sur ce point pour s'assurer qu'ils seront invités à intervenir.

8. Au cours de la réunion, les délégués, qu'ils soient présents au Palais des Congrès à Versailles ou qu'ils participent en ligne, pourront contribuer aux discussions ou faire des déclarations, le temps de parole étant cependant limité à cinq (5) minutes maximum. Des déclarations vidéo pré-enregistrées, également limitées à cinq (5) minutes, pourront être soumises avant le début de la 27e réunion de la CGPM et seront diffusées comme si elles constituaient une intervention en direct. Ces déclarations vidéo, et toute autre contribution en ligne, feront partie des procès-verbaux de la réunion.

9. Le personnel du BIPM apportera l'assistance administrative, technique et logistique nécessaire à la préparation et à la conduite de la 27e réunion de la CGPM dans un format hybride.

III. ADOPTION DES RÉSOLUTIONS ET DÉCISIONS

10. Conformément à la pratique établie lors des réunions de la CGPM, le président de la CGPM mettra tout en œuvre, en coopération avec les États Parties, pour parvenir à un consensus général au sujet des résolutions et décisions. Il s'agit en l'occurrence de chercher à obtenir un consensus général, caractérisé par l'absence d'opposition ferme à l'encontre de sujets essentiels et par un processus de prise en considération des vues de tous les États Parties et de rapprochement des positions divergentes éventuelles.

11. À la fin de chaque discussion, le président demandera par conséquent aux chefs de délégation d'indiquer à main levée s'ils approuvent une résolution, la rejettent ou s'abstiennent. Tout sera entrepris pour parvenir à un consensus et adopter les résolutions lors de la réunion en suivant ce processus.

12. Lors de précédentes réunions, la CGPM a choisi d'adopter certaines résolutions spécifiques par un vote par appel nominal des États Parties en demandant à chaque délégation d'exprimer son vote. Un tel processus devra être évité car, d'un point de vue logistique, il est difficile lors d'un vote par appel nominal au cours d'une réunion hybride de garantir que le chef de chaque délégation sera disponible.

13. Lors de la présentation de chaque projet de résolution, le président indiquera quel processus de vote parmi ceux précédemment mentionnés il propose d'utiliser à la fin de la discussion.

IV. CHAMP DES RÉSOLUTIONS OU DÉCISIONS À ADOPTER

14. Tenant particulièrement compte des défis que présente l'adoption des résolutions et décisions par les processus précédemment décrits, le CIPM propose que la CGPM à sa 27e réunion se prononce sur des résolutions ou décisions :

    i. qui sont essentielles à la réalisation du Programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027, telles celles concernant la dotation annuelle du BIPM ;

    ii. qui sont soumises à des contraintes de temps et requièrent de répondre à l'évolution des besoins et des demandes dans différents domaines de la métrologie, et pour lesquelles il est possible de parvenir facilement à un consensus.

15. La Convocation de la 27e réunion de la CGPM comprend par conséquent des projets de résolution qui répondent aux critères susmentionnés.

16. Les sujets pour lesquels les 63 États Membres ne sont pas parvenus à un consensus pourront être discutés et un rapport pourra être présenté au cours de la 27e réunion de la CGPM.

V. ÉLECTIONS

17. En vertu de l'article 7 du Règlement annexé, la CGPM conduit les élections au scrutin secret. Un vote au scrutin secret sur site au Palais des Congrès sera organisé avec l'assistance d'un service tiers de vote pour l'élection des membres du CIPM et celle de la Commission pour l'élection du CIPM. Tout sera mis en œuvre pour s'assurer que ces élections se déroulent en personne et de façon rapide, à l'aide d'outils de vote fiables et sécurisés, tel que requis.

VI. MISE EN ŒUVRE DE LA PROCÉDURE SPÉCIALE

18. La décision d'appliquer la présente Procédure spéciale appartient uniquement aux États Parties. Ces derniers doivent par conséquent entériner et approuver formellement la présente Procédure spéciale à l'ouverture de la 27e réunion de la CGPM.

Note concernant la version publiée le 22 juillet 2022.

Cette version inclut des amendements apportés au texte concernant le champ des discussions (Section IV) et la procédure de vote (Section V) suite aux commentaires soumis par les États Membres.

Annexe B – Projets proposés dans le programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027

Le document « Projets proposés dans le programme de travail du BIPM pour les années 2024 à 2027 » est publié uniquement sous forme électronique sur une page dédiée sur le site internet du BIPM.

BIPM
ΜΕΤΡΩ ΧΡΩ

Bureau International des Poids et Mesures

General Conference on Weights and Measures

27th meeting (15-18 November 2022)

Note on the use of the English text

To make its work more widely accessible the International Committee for Weights and Measures publishes an English version of its reports.

Readers should note that the official record is always that of the French text. This must be used when an authoritative reference is required or when there is doubt about the interpretation of the text.

Table of contents

List of delegates and invitees **9**

Proceedings, 15-18 November 2022 **229**

Agenda **236**

First session – 15 November 2022 (morning)

1. Presentation of credentials by delegates **239**
2. Opening of the meeting by the President of the Académie des Sciences, President of the 27th meeting of the CGPM **239**
3. Formal opening address by the Director General of the Laboratoire national de métrologie et d'essais on behalf of the French Republic **239**
4. Reply by the CIPM President **241**
5. Address by the President of the Académie des Sciences **242**
6. Nomination of the Secretary of the CGPM **245**
7. Establishment of the list of delegates entitled to vote in-person and on-line **245**
8. Approval of the agenda **247**
9. Approval of the special procedure **247**
10. Report by the President of the CIPM on the work accomplished since the 26th meeting of the CGPM **248**
    - 10.1. Member States and Associates **248**
    - 10.2. The CIPM **250**
    - 10.3. Actions arising from Resolutions taken at the 26th CGPM (2018) **252**
    - 10.4. Report on the actions taken by the CIPM towards a "CIPM Strategy 2030+" **254**
    - 10.5. CIPM Consultative Committees **260**
    - 10.6. CIPM MRA **264**
    - 10.7. Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT) **265**
    - 10.8. Looking to the future **265**
    - 10.9. Conclusion **266**

Second session – 15 November 2022 (afternoon)

11. Report by the Director of the BIPM "Highlights from the Work Programme" **267**
12. Introduction to Draft Resolution A "Evolving Needs in Metrology" **271**
13. Metrology for Climate Action: agreed outcomes and next steps from the WMO-BIPM Workshop **272**
14. Report from the President of the CCQM **276**
15. Metrology for accurate satellite-based observations of climate variables **282**
16. Report from the President of the CCPR **285**
17. Report from the President of the CCT **289**

Third session – 16 November 2022 (morning)

18. The work of the JCTLM to overcome challenges to the global standardization of clinical laboratory testing **295**
19. Accurate diagnostics as part of metrology readiness for potential future pandemic events **298**
20. Report on liaison activities from the IAEA **301**
21. Report from the President of the CCRI **303**
22. Report on BIPM Finance **310**
23. Presentation of the BIPM Work Programme for 2024-2027 **311**
24. Report on liaison activities from the OIML **314**
25. Standardization, industrialization and the UN Sustainable Development Goals **317**
26. Report on progress towards the recognition by UNESCO of World Metrology Day **319**
27. Introduction to Draft Resolution F "Universal adherence to the Metre Convention" **320**

Fourth session – 17 November 2022 (morning)

28. Report from the President of the CCL **322**
29. Regulation and quality infrastructure: addressing the challenges of two worlds apart **328**
30. Applying the FAIR principles to the worlds of research and measurement **331**
31. Report on liaison activities from the ISO **334**
32. Report from the President of the CCU **336**
33. Introduction to Draft Resolution C "On the extension of the range of SI prefixes" **340**
34. Introduction to Draft Resolution B "On the global digital transformation and the International System of Units" **342**
35. Summary of discussions at the informal dotation meeting **344**
36. Report from the Co-Chairs of the *ad hoc* Working Group of Member State Representatives **344**

Fifth session – 17 November 2022 (afternoon)

37. Time and Frequency Metrology in Space Missions **347**

38. Optical clocks at 10^{-18} accuracy: challenges and applications **350**

39. Report from the President of the CCTF **353**

40. Introduction to Draft Resolutions D “On the use and future development of UTC” and E “On the future redefinition of the second” **356**

41. Report on liaison activities from the CTBTO **360**

42. Report from the President of the CCAUV **363**

43. Report from the Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM (JCRB) **369**

44. Report from the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) **370**

Sixth session – 18 November 2022 (morning)

45. Implementing the new SI (breaking the invisible chain) **372**

46. Report from the President of the CCM **374**

47. Metrology for future sustainable energy networks **378**

48. Report from the President of the CCEM **381**

49. Introduction to Draft Resolution V “On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027” **386**

50. Voting on Draft Resolution V “On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027” **386**

51. Opening of voting on election of the CIPM and CEC (explanation and method) **387**

52. Voting on Draft Resolutions A, B and C **387**

Seventh session – 18 November 2022 (afternoon)

53. Voting on Draft Resolutions D, E and F **389**

54. Announcement of the results of the election of the CIPM and the CEC **389**

55. Plans for the 150th anniversary of the Metre Convention on 20 May 2025 **391**

58. Other business **392**

59. Closure of the meeting **392**

Resolutions adopted by the General Conference on Weights and Measures at its 27th meeting (2022) 393

Resolution 1 – On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology" **394**

Resolution 2 – On the global digital transformation and the International System of Units **395**

Resolution 3 – On the extension of the range of SI prefixes **397**

Resolution 4 – On the use and future development of UTC **398**

Resolution 5 – On the future redefinition of the second **400**

Resolution 6 – On universal adherence to the Metre Convention **401**

Resolution 7 – On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures **403**

Appendix A Convocation and Special Procedure **404**

Appendix B Proposals for the Work Programme of the BIPM for the four years 2024-2027 **412**

List of acronyms used in the present volume 413

Proceedings of the 27th meeting
of the General Conference
on Weights and Measures
15-18 November 2022

Agenda

First session – 15 November 2022 (morning)

1. Presentation of credentials by delegates
2. Opening of the meeting by the President of the Académie des Sciences, President of the 27th meeting of the CGPM *(P. Flandrin, Académie des Sciences)*
3. Formal opening address by the Director General of the Laboratoire national de métrologie et d'essais on behalf of the French Republic *(T. Grenon, LNE)*
4. Reply by the CIPM President *(W. Louw, CIPM)*
5. Address by the President of the Académie des Sciences *(P. Flandrin, Académie des Sciences)*
6. Nomination of the Secretary of the CGPM *(T. Usuda, CIPM)*
7. Establishment of the list of delegates entitled to vote in-person and on-line *(P. Flandrin, Académie des Sciences)*
8. Approval of the agenda *(P. Flandrin, Académie des Sciences)*
9. Approval of the special procedure *(T. Usuda, CIPM)*
10. Report by the President of the CIPM on the work accomplished since the 26th meeting of the CGPM *(W. Louw, CIPM)*

Second session – 15 November 2022 (afternoon)

11. Report by the Director of the BIPM "Highlights from the Work Programme" *(M. Milton, BIPM)*
12. Introduction to Draft Resolution A "Evolving Needs in Metrology" *(G. Rietveld, CIPM, and D. del Campo, CIPM)*
13. Metrology for Climate Action: agreed outcomes and next steps from the WMO-BIPM Workshop *(A. Rea, WMO)*
14. Report from the President of the CCQM *(S.-R. Park, CIPM)*
15. Metrology for accurate satellite-based observations of climate variables *(C. Donlon, ESA)*
16. Report from the President of the CCPR *(M.L. Rastello, CIPM)*
17. Report from the President of the CCT *(Y. Duan, CIPM)*

Third session – 16 November 2022 (morning)

18. The work of the JCTLM to overcome challenges to the global standardization of clinical laboratory testing *(G. Miller, IFCC)*
19. Accurate diagnostics as part of metrology readiness for potential future pandemic events *(M. Zambon, HSE)*
20. Report on liaison activities from the IAEA *(Z. Msimang, IAEA)*
21. Report from the President of the CCRI *(M. Sené, CIPM)*
22. Report on BIPM Finance *(P. Richard, CIPM)*

23. Presentation of the BIPM Work Programme for 2024-2027 *(M. Milton, BIPM)*
24. Report on liaison activities from the OIML *(A. Donellan, OIML)*
25. Standardization, industrialization and the UN Sustainable Development Goals *(Y. Yasunaga, UNIDO)*
26. Report on progress towards the recognition by UNESCO of World Metrology Day *(R. Alibekov, représentant de l'ambassade du Kazakhstan à Paris)*
27. Introduction to Draft Resolution F "Universal adherence to the Metre Convention" *(A. Steele, CIPM, and A. Samuel, NMIA)*

Fourth session – 17 November 2022 (morning)

28. Report from the President of the CCL *(I. Castelazo, CIPM)*
29. Regulation and quality infrastructure: addressing the challenges of two worlds apart *(M. Karttunen, OECD)*
30. Applying the FAIR principles to the worlds of research and measurement *(S. Hodson, CODATA)*
31. Report on liaison activities from the ISO *(C. Draghici, ISO)*
32. Report from the President of the CCU *(J. Ullrich, CIPM)*
33. Introduction to Draft Resolution C "On the extension of the range of SI prefixes" *(R. Brown, NPL)*
34. Introduction to Draft Resolution B "On the global digital transformation and the International System of Units" *(J. Ullrich, CIPM)*
35. Summary of discussions at the informal dotation meeting *(W. Louw, CIPM)*
36. Report from the Co-Chairs of the ad hoc Working Group of Member State Representatives *(R. Gunn, United-Kingdom, and D. Benjamin, Brazil)*

Fifth session – 17 November 2022 (afternoon)

37. Time and Frequency Metrology in Space Missions *(J. Benedicto, ESA)*
38. Optical clocks at 10−18 accuracy: challenges and applications *(C. Salomon, CNRS)*
39. Report from the President of the CCTF *(N. Dimarcq, CIPM)*
40. Introduction to Draft Resolutions D "On the use and future development of UTC" and E "On the future redefinition of the second" *(N. Dimarcq, CIPM)*
41. Report on liaison activities from the CTBTO *(B. Doury, CTBTO)*
42. Report from the President of the CCAUV *(H. Laiz, CIPM)*
43. Report from the Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM (JCRB) *(J. Olthoff, CIPM)*
44. Report from the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) *(P. Neyezhmakov, CIPM)*

Sixth session – 18 November 2022 (morning)

45. Implementing the new SI (breaking the invisible chain)
46. Report from the President of the CCM
47. Metrology for future sustainable energy networks
48. Report from the President of the CCEM
49. Introduction to Draft Resolution V "On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027" *(W. Louw, CIPM)*
50. Voting on Draft Resolution V "On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027" *(P. Flandrin, Académie des Sciences)*
51. Opening of voting on election of the CIPM and CEC (explanation and method) *(R. Gunn, United-Kingdom)*
52. Voting on Draft Resolutions A, B and C *(P. Flandrin, Académie des Sciences)*

Seventh session – 18 November 2022 (afternoon)

53. Voting on Draft Resolutions D, E and F *(P. Flandrin, Académie des Sciences)*
54. Announcement of the results of the election of the CIPM and the CEC *(External scrutator)*
55. Plans for the 150th anniversary of the Metre Convention on 20 May 2025 *(W. Louw, CIPM)*
56. Other business
57. Closure of the meeting

First session – 15 November 2022 (morning)

1. Presentation of credentials by delegates

As specified by the Convocation to the 27th meeting (2022) of the General Conference on Weights and Measures (hereinafter CGPM or General Conference), delegates were required to present credentials from their Governments or authorities.

2. Opening of the meeting by the President of the Académie des Sciences, President of the 27th meeting of the CGPM

Prof. Patrick Flandrin, President of the Académie des sciences de Paris and President of the CGPM for its 27th meeting, opened the first session on 15 November 2022 with the following speech (translated from French).

> "Mr Director of the *Laboratoire national de métrologie et d'essais*, Mr President of the CIPM, Mr Director of the BIPM, Ladies and Gentlemen, Delegates, Dear Colleagues, Ladies and Gentlemen,
>
> It is the duty of the President of the *Académie des sciences* to chair the General Conference on Weights and Measures, and it is in this capacity that I take the floor at this opening session. I am honoured and obliged to do so, and I would like to share with you, as well as with the delegations of the many countries represented here, the pleasure I have in welcoming you today to Versailles for this 27th General Conference on Weights and Measures.
>
> This Conference was carefully and efficiently prepared by the secretariat of the International Bureau of Weights and Measures, the international organization created by the Metre Convention in 1875, whose main mission is to ensure and promote the world-wide harmonization of measurements. I would like to congratulate and thank all the BIPM staff members.
>
> On behalf of the *Académie des sciences*, I wish you all an excellent 27th General Conference, full of interaction, dialogue and exchanges that I am sure will be fruitful.
>
> I will now give the floor to Mr Thomas Grenon, Director of the *Laboratoire national de métrologie et d'essais*, for the official opening address."

3. Formal opening address by the Director General of the *Laboratoire national de métrologie et d'essais on* behalf of the French Republic

M. Thomas Grenon, Director General of the LNE, formally opened the 27th meeting of the CGPM with the following address (translated from French).

> "Mr President of the *Académie des sciences*, Mr President of the International Committee for Weights and Measures, Mr Director of the International Bureau of Weights and Measures, Ladies and Gentlemen, Delegates, Ladies and Gentlemen, Dear Colleagues,

On behalf of the Government of the French Republic, it is my great honour and pleasure to welcome you today to Versailles for the opening of this 27th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM).

France has the privilege of being, since 1875, the depositary of the Metre Convention, signed in Paris at the time by seventeen States, with the aim, as stated in the preamble of this convention, of ensuring the international unification and perfection of the metric system. This international treaty established a world authority in the field of metrology, the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), operating under the responsibility of an International Committee for Weights and Measures (CIPM), itself under the authority of the General Conference on Weights and Measures (CGPM), for which we are gathered here today. If the main mission of the International Bureau of Weights and Measures was originally the conservation of standards, it has constantly evolved with the increase of trade, the development of science and technology, the emergence of global issues, and of course the dematerialization of standards. For France, it is clear that the BIPM is an international organization, even if the Convention did not specify this at the time. As such, the BIPM has a legal personality distinct from that of the Member States, which allows it in particular to conclude international agreements. This is the reason France concluded a Headquarters Agreement with this organization.

The Metre Convention is today ratified by 64 Member States and there are 36 Associate States of the CGPM. We will very soon celebrate its 150th anniversary on 20 May 2025; your large presence today shows the strength of the organization.

In 2018, we lived through the 26th meeting of the General Conference with great emotion as it was an exceptional conference that adopted a resolution to redefine four of the seven base units of the International System of Units. Since then, this resolution has been implemented by a large number of Member States and we are delighted with this.

Metrology is a cross-cutting scientific discipline, at the forefront of research and innovation, and it is omnipresent in our daily lives. It is essential to the evolution of our society and to the sustainable development of our economy and industry, it is essential to the safety and health of our fellow citizens, and I am thinking of the pandemic that hit us all hard, and I am also thinking of the challenge posed by global warming. We will return to those subjects throughout this conference.

We are also all aware of the current societal and global challenges: protection of biodiversity, climate change, personalized health, development of artificial intelligence in many fields, food security, energy problems, quantum technologies; I could name many more evolving fields. Digital transformation is accelerating and concerns new topics such as mass data qualification, data management and integration into increasingly complex systems and instrumentation, digital twins and learning machines. Metrology must be involved in all these challenges and ensure reliability and confidence in these new tools, which are essential to their development and acceptability.

So many fields of exploration are in progress and are to come for our science!

Metrology has been able to adapt to the various industrial and technological revolutions throughout our history. The various Nobel Prizes that have marked our science and contributed to the progress of metrology are a strong demonstration to this: Albert Michelson, Charles-Édouard Guillaume, Bryan Josephson, Klaus von Klitzing, Norman Ramsey, Bill Philips, Stephan Chu, Claude Cohen-Tannoudji, John Hall and very recently Alain Aspect who, I know, is really committed to metrology.

The continuous improvement of the International System of Units is fundamental to keep pace with scientific advances and technological challenges.

Today, the work of many National Metrology Institutes has demonstrated that the accuracy of optical frequency standards, based on different species and transitions, exceeds the accuracy that can be achieved by the current *mise en pratique* of the definition of the second, based on a caesium transition, by a factor of about 100, which is considerable. These advances make it possible to consider improving the realization and dissemination of time scales, in particular the Coordinated Universal Time (UTC). This Conference will be able to discuss and debate a roadmap to propose a new definition of the second in a few years and the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) will report on its work. A new adventure is starting, to always better meet the future needs of industry and society.

The Coordinated Universal Time (UTC) is the only time scale recommended as an international reference and it is the basis for civil time in most countries. As it is used as the unique reference time scale for all applications, including advanced digital networks and satellite systems, UTC needs to be clearly defined and to maintain its agreement with International Atomic Time.

Since its creation, the BIPM managed to make its missions evolve to meet the needs of the international community. It also managed to improve the efficiency of its operations and I wanted to underline this today. It is clear that in this period of extremely tight global financial conditions and severe budgetary constraints on Member States, it is essential that the BIPM be able to continue to fulfil its mission as a scientific intergovernmental organization with expertise in the field of metrology. At the same time, the support given to the BIPM, particularly by the NMIs, is to be commended and should continue.

I believe it is essential to continue the scientific cooperation that supports this vision of an international metrology. The ambition of universal participation of the greatest number of people, expressed since 1921 in the Metre Convention, must be maintained in order to achieve a scientific ideal that was carried by the French Revolution, i.e. a universal system of measurement designed, and I quote, “for all times, for all peoples”.

I am convinced that the Resolutions to be adopted during this meeting of the General Conference on Weights and Measures will continue to serve the interests of the international community in the same spirit as the one that inspired its founders. I thank you and wish you all an excellent 27th General Conference on Weights and Measures.”

4. Reply by the CIPM President

Dr Louw, President of the International Committee for Weights and Measures (hereinafter CIPM) thanked M. Grenon for his speech and welcoming remarks to the Conference. He said that the world recognizes the leading role of France in the invention and development of the Metric System. France acts as the depository of the Metre Convention, under the authority of which the delegates gather, and hosts the BIPM Headquarters in Sèvres. Science is one of the most powerful driving forces of globalization. Science is also fundamental to the advancement of measurement and metrology. The science of measurement goes hand in hand with advances in new or emerging technologies particularly the areas of environment, biotechnology, medical testing, and something which is very current on everyone’s agenda; digitalization. Dr Louw underlined that the representatives of the seventeen nations that signed the Metre Convention in 1875 would be pleasantly surprised to see the progress made since then. There is still much to do, some of which will be on the agenda of the 27th meeting. He thanked all the delegates for participating in this progress and once again thanked M. Grenon for his speech.

5. Address by the President of the Académie des Sciences

Prof. Flandrin, President of the Académie des Sciences, gave the following speech (translated from French).

"Ladies and Gentlemen,

Four years ago, a spectacular step was taken with the adoption of a major revision of the International System of Units (SI), which now defines the seven base units from the fixed numerical value of selected physical constants, thus shaking up existing habits and opening up new perspectives.

In his introduction to the 26th General Conference, which saw this remarkable development, the then President of the *Académie des sciences*, Sébastien Candel, recalled how the evolution towards the International System of Units had its origins in the reforming, universalist and unifying impetus of the French Revolution and emphasized the role that the *Académie des sciences* had played in its definition and implementation. Without going back over all the aspects of the scientific, political and societal adventure that this represented, it is worth recalling a few elements because the principles that presided over this work and its implementation remain more relevant than ever.

We should not forget that before the French Revolution, the landscape was most disparate. The diversity of units of measurement and the imprecision of their definitions were detrimental to the economy and to commercial exchanges, and even if the unification of weights and measures was clearly an important demand in the 1789 registers of grievances, this was not specific to France but shared at least on a European scale. What was true from an economic point of view was also true from a scientific point of view, as the difficulty of having common references was an obvious obstacle to international cooperation as it limited the possibilities of sharing measurements and observations made in different States.

On the eve of the French Revolution, on 27 June 1789, the *Académie des sciences* created a commission to address this situation and standardize weights and measures. Less than a month later, on 25 July 1789, the Kingdom of Great Britain proposed a first standardization measure by recommending the use of a unit of length defined as that of a pendulum beating the second at the latitude of London. Under the impetus of Talleyrand, the Constituent Assembly proposed on 9 March 1790 to establish a single system of measurements which would be, and I quote, "based on an invariable prototype, taken from nature". The idea was that this mission would be entrusted jointly to the *Académie des sciences* and the Royal Society, but it would not last long. Indeed, the *Académie des sciences* quickly issued two recommendations, on 8 May 1790, namely the choice of a unit of length in the spirit of the British proposal but with no reference to latitude, and the adoption of a decimal scale for weights, measures and currencies. Unfortunately, the British refused the collaboration proposed by France and the paths of a first possible unification separated. In March 1791, the *Académie des sciences* gave up basing the standard of length on the pendulum beating the second, preferring the ten millionth part of the quarter of the terrestrial meridian, as expeditions sent by the *Académie* had just evaluated it with precision. That is how the metre was officially born on 11 July 1792 and, thanks to the adoption of the decimal system, its units were linked in ratios of ten, "decimetre", "centimetre", etc. It was not until 10 December 1799 that the "definitive metre" was adopted at the end of a first international congress gathering scientists from countries allied to France.

If it is one thing to decide on new units, it is another to have them accepted. On a different note, we Europeans were able to experience this ourselves recently with the introduction of the euro as a common currency. Breaking with custom to move from theory to practice will take time, and in France a law to impose the unique and definitive use of the metric system on 1 January 1840 was necessary. Then, in 1875, the "Metre Convention" was signed, which gave birth to a physical standard of the

metre and to the International Bureau of Weights and Measures, an international organization created by seventeen signatory nations and whose action has continued to increase to this day.

Several lessons can be drawn from this adventure of the metre. The first one is of a scientific and technical nature, in that it was initially a question of relating the choice of a unit to an "invariable prototype, taken from nature", to quote Talleyrand. This choice is of course by no means unique, and the rest of the story will prove it: from 1967, the unit of length was linked neither directly to time (as for the second beaten by a pendulum), nor to the terrestrial space (as with a fraction of the meridian or the artefact of a platinum iridium bar), but to a distance travelled by light whose speed is fixed. The other lesson is that the adoption of a unit must be universally shared "for all times, for all peoples", in the spirit of equality and fraternity of the French Revolution, which requires individualisms to be overcome to search for a common good, for the benefit of all humanity.

Through all the vicissitudes of history, the initial impetus for unification and universalism, as supported by the Member States at the creation of the International Bureau of Weights and Measures, has been carried forward with determination since 1875, and the agenda of this 27th conference clearly attests to this once again, with several draft resolutions and perspectives for future conferences. Not being a specialist in metrology, I have learned to appreciate its importance and the stakes involved thanks to the invaluable help of the "*Comité Science et Métrologie*" of our *Académie* and of its convenors, Christian Bordé and Christophe Salomon, who I am particularly pleased to thank.

Among the perspectives in focus is the redefinition of the second, for which this conference will propose the setting of landmarks so that they be debated in 2026 and adopted in 2030. A roadmap has been prepared for this purpose by the Consultative Committee for Time and Frequency, whose work I commend.

If this question is of particular interest to me and if I wish to say a few words about it, it is not only because of the importance of the choice of this last unit, but also because the name of this Committee, "Consultative Committee for Time and Frequency", is echoed in my own research by combining the terms time and frequency. Time-frequency analysis has always been at the heart of my work as a researcher in signal processing and I have devoted several books to it.

According to the resolution adopted in 2018 at the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures, the second is now defined, and I quote, "by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium-133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}".

It is of course significant that we must finally refer to a frequency reference to establish a unit of time, which is of course not surprising when we know the relationships and constraints that the notions of time and frequency have between them. Mathematicians will say that these are canonically conjugate variables, which was formalized by the work of Joseph Fourier, whose 200th centenary of the publication of his treatise *The Analytical Theory of Heat* is being celebrated in 2022. Physicists will add, following Werner Heisenberg, that the coupling that binds the descriptions of the same quantity in time and in frequency is so that the greater the precision in one domain, the lower the precision in the other. Fourier's mathematical achievement was to show that any waveform, however complex, can be represented as a superposition of monochromatic waves, i.e. of pure frequencies. The physical limitation of his approach, however, is that for a wave to be truly monochromatic, it has to abide by Heisenberg's uncertainty principle and be eternal.

This situation opens the way to two questions whose recent signal analysis showed they are linked and likely to cross metrological questions: on the one hand, to consider the notion of frequency in a way that is more in line with physics intuition by being freed from the constraint of eternity; on the other hand, to explore the stability of an oscillation that is supposed to be periodic, on a

fixed time scale. To move away from Fourier's eternal waves means to put into action mathematically a very simple intuition: that of the musical notation which fixes a duration to a note whose pitch nevertheless carries a frequency information. The variant of Fourier analysis that results from this approach is called wavelet analysis. In addition to providing an intuitive answer to the concern of writing a sort of score for a signal, its definition is based on the idea of a time scale. It was then possible to show that this offers a possibility to revisit metrology tools like the Allan variance, widely used to quantify the stability of an atomic clock. This is probably an anecdotal story but it has allowed me to draw a parallel between my own work and concerns specific to this Conference and to underline the interest of multidisciplinary approaches combining mathematics, physics and algorithms.

To return to the Conference that brings us together this week, the richness of its programme testifies to the vitality of a field that we do not always suspect to what extent it impacts our daily lives. The concern for unification conveyed by this programme is a very good example of what science, as a privileged ground for sharing and bringing people together on a global scale, can do. Science, as a bearer of universalism, has a role to play in the relations that people have with each other, and the collaborative efforts that it requires must not only be shared but also carried by partners who have a common vision of mutual respect and freedom.

At this point, the *Académie des sciences* wishes to reiterate that, for the *Académie des sciences* and all the G7 Academies of Sciences, the Russian aggression against Ukraine is an attack on the fundamental principles of freedom, democracy and self-determination, which form the basis of academic freedom and the possibilities of scientific exchange and cooperation.

On behalf of the *Académie des sciences*, I wish you all an excellent 27th General Conference with fruitful interactions, dialogues and exchanges."

Prof. Flandrin announced that a number of Member States had requested the opportunity to make statements. Delegates from the Member States that had submitted such requests were invited to speak and made the following statements:

From the United States of America: "As the US Secretary of State, Antony Blinken has said, the United States is united with our allies and partners in the face of Russian aggression and will continue to stand with Ukraine as it fights for its future".

From the United Kingdom: "The government of the United Kingdom are united with their allies in the face of Russian aggression and will continue to stand with Ukraine as it fights for its future."

From Australia: "Australia condemns in the strongest terms Russia's unprovoked, unjust and illegal invasion of Ukraine, which is a gross violation of international law, including the Charter of the United Nations."

From Canada: "Canada stands with our allies and partners united in the face of Russian aggression and will continue to stand with Ukraine as it fights for its future."

From Estonia: "Estonia condemns in the strongest possible terms Russia's unprovoked and unjustified act of aggression against Ukraine, which grossly violates the international law and undermines international security and stability. Russia's war has destroyed parts of the quality infrastructure in Ukraine. Our colleagues in Ukraine have lost their homes and must worry about the safety of their families. We all have the moral obligation to support Ukraine in any possible means."

From Poland: "The Polish delegation supports the comment previously made by Estonia, and Poland also supports Ukraine."

Prof. Flandrin thanked the delegates for their statements and returned to the agenda.

6. Nomination of the Secretary of the CGPM

The President proposed Dr Usuda, Secretary of the CIPM, as Secretary of the CGPM. Dr Usuda was elected by consensus.

7. Establishment of the list of delegates entitled to vote in-person and on-line

Dr Usuda welcomed the delegates of Member States and Associate States and Economies, both in-person and on-line, to the 27th meeting of the CGPM. He said that the established practice was to develop a list of those Delegates entitled to vote on behalf of their State, by asking the head of each delegation to respond indicating the presence of the delegation. This practice would be changed to reflect the special circumstances of the 27th meeting, which was being held in a hybrid format. Instead, the Secretary read out a list of Member States and confirmed whether they were present in-person, on-line or were absent.

Member State	**Status of attendance**
Argentina	In-person
Australia	In-person
Austria	In-person
Belarus	In-person
Belgium	On-line
Brazil	In-person
Bulgaria	Absent
Canada	In-person
Chile	Absent
China	In-person
Colombia	On-line
Costa Rica	In-person
Croatia	In-person
Czechia	In-person
Denmark	Absent
Ecuador	Absent
Egypt	In-person
Estonia	In-person
Finland	In-person
France	In-person
Germany	In-person

Greece	In-person
Hungary	On-line
India	In-person
Indonesia	In-person
Islamic Republic of Iran	On-line
Iraq	On-line
Ireland	In-person
Israel	In-person
Italy	In-person
Japan	In-person
Kazakhstan	In-person
Kenya	In-person
Republic of Korea	In-person
Lithuania	In-person
Malaysia	On-line
Mexico	In-person
Montenegro	In-person
Morocco	In-person
Netherlands	In-person
New Zealand	In-person
Norway	In-person
Pakistan	Absent
Poland	In-person
Portugal	In-person
Romania	On-line
Russian Federation	In-person
Saudi Arabia	In-person
Serbia	Absent
Singapore	In-person
Slovakia	In-person
Slovenia	In-person
South Africa	In-person
Spain	In-person
Sweden	In-person

Switzerland	In-person
Thailand	In-person
Tunisia	In-person
Türkiye	In-person
Ukraine	On-line
United Arab Emirates	In-person
United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	In-person
United States of America	In-person
Uruguay	On-line

Of the 64 Member States, 58 were represented and the majority was therefore 30. Of the 58 Member States whose delegates presented credentials, 49 attended in-person and nine were on-line.

8. Approval of the agenda

The President of the CGPM asked if there were any comments on the agenda. There were no comments and the agenda was adopted.

9. Approval of the special procedure

The Secretary of the CGPM referred to the *CGPM Working Document, October 2022*, which included the draft text of the Special Procedure regulating the conduct of the meeting. The purpose of this Special Procedure was to allow the 27th meeting of the CGPM to be held in a hybrid format, with both in-person and remote participation of representatives of Member States and also representatives from Associate States and Economies of the CGPM and invited observers. The Secretary emphasized that the Special Procedure is exceptional and does not amount to a modification of the provisions of the Metre Convention and Annexed Regulations. Other International Organizations based in France have used a similar procedure allowing their governing bodies and general assemblies to function despite travel restrictions.

The original text of the Special Procedure had been circulated to Member States on 11 February 2022, along with the Convocation of the 27th meeting of the CGPM. Member States were asked to confirm to the CIPM Secretary, by 30 June 2022, whether or not they agreed in principle to adopt the Procedure. The majority of Member States confirmed their agreement, however two Member States indicated that they would not support the proposal for on-line voting. A revised version of the Special Procedure was drafted, which excluded the possibility of on-line voting for members of the CIPM and Committee for the Election of the CIPM (CEC). Section V, Clause 17 of the revised Special Procedure states that "*Pursuant to Article 7 of the Annexed Regulations, the CGPM conducts elections using a secret ballot. An on-site secret ballot will be organized, with the support of a third-party voting service, for the election of the members of the CIPM and of the Committee for the Election of the CIPM (CEC). All efforts shall be made to ensure these elections are carried out in-person and expeditiously using reliable and secure voting tools, as appropriate.*" This version was published on 22 July 2022 and presented to Member State representatives at an on-line preparatory

meeting on 6 September 2022 and at the hybrid preparatory meeting on 14 November 2022.

The President of the CGPM called for a show of hands in favour of adopting the Special Procedure, which was adopted unanimously by the CGPM.

10. Report by the President of the CIPM on the work accomplished since the 26th meeting of the CGPM

Dr Louw, President of the CIPM, presented his report.

"In accordance with the Metre Convention, it is my pleasure to report on the work accomplished since the 26th meeting of the CGPM held in 2018.

At its first meeting in March 2019, the newly elected CIPM, mindful that the important focus of the past two decades, the revision of the International System of Units (SI), was concluded, decided to focus on the development of a Strategy 2030+ for the BIPM.

The development of this strategy has a focus on addressing the key scientific challenges (firstly implementing the Revised SI), responding to evolving needs in metrology, deepening engagement with other international organizations on measurement science issues, reviewing the strategy for future membership of the organization, and modernizing the operations of the organization.

Amid the challenges that the Covid-19 pandemic introduced, the CIPM continued with its work and a report on the strategy development has been published, and progress reports have been given at meetings of Government Representatives and Directors of National Metrology Institutes, which were held at the BIPM Headquarters on 17 and 18 October 2019 and on-line during October 2020 and 2021.

It is thus not my intention to go into detail in this report but rather to highlight the main actions and achievements.

10.1 Member States and Associates

I would like to start by welcoming delegations from new Member States and new Associates of the CGPM. Since the 26th meeting of the CGPM, five States have acceded to the Metre Convention. Four of these were previously Associates of the CGPM. We also have one new Associate of the CGPM. An additional Associate State was reinstated after a brief absence.

There are currently 64 States party to the Metre Convention and 36 Associates (33 Associate States and 3 Associate Economies).

Sadly, two Associates have been excluded due to persistent non-payment of subscriptions, and one Associate has withdrawn for economic reasons. We hope that in the future they may once again choose to participate. The changes in the portfolio of Member States and Associates since the 26th meeting of the CGPM are shown below.

New Member State (date of accession):

- Morocco (24 May 2019)

Member States that acceded to the Metre Convention from Associate status (date of accession):

- Ecuador (6 August 2019)
- Belarus (13 January 2020)

– Estonia (19 January 2021)

– Costa Rica (5 September 2022)

New Associate of the CGPM (date of becoming an Associate):

– Cambodia (1 January 2021)

Reinstated as an Associate of the CGPM (and date of reinstatement):

– Zimbabwe (8 February 2022)

Excluded Associates of the CGPM (date of exclusion):

– Cuba (1 January 2022)

– Sudan (1 January 2022)

Withdrawn as an Associate of the CGPM (date of withdrawal):

– Seychelles (1 January 2022)

Associates encouraged to accede to the Metre Convention

In accordance with Resolution 4 of the 24th CGPM (2011) there are currently seven Associates that have met the criteria and have been encouraged to accede to the Metre Convention. Six of them are already on the so called escalator mechanism, the seventh will enter the escalator in 2023. It will be recalled that once formally encouraged to accede, Associates that do not accede have their subscriptions increased in steps over a period of 5 years until they pay, as a subscription, 90 % of the amount they would pay as a Member State. Overall, this approach has worked well, with a number of accessions attributable to this mechanism.

Following the implementation of Decisions CIPM/106-20, CIPM/106-21 and CIPM/106-22 (2017), the current status of Associates encouraged to accede and paying enhanced subscriptions is as follows[1]:

Associate	**Date meeting 'encouragement' criteria**	**Period of increasing subscription**	
		Start	**90 % of the Member State's annual contribution from**
Latvia	2011	2013	2017
Panama	2011	2013	2017
Viet Nam	2011	2013	2017
Peru	2014	2016	2020
Philippines	2014	2016	2020
Azerbaijan	2020	2022	2026
Luxembourg	2021	2023	2027

[1] Pursuant to Resolution 4 of the 24th meeting of the CGPM the progressive and irreversible increase in the amount of annual subscription will be applicable starting on the 1 January of the second year following the CIPM decision to encourage an Associate to become a State party to the Metre Convention.

10.2 The CIPM

In accordance with Resolution 2 of the 25th meeting of the CGPM (2014), an election was held to fill all 18 CIPM positions. The elected Members subsequently met in March 2019 and elected a bureau comprising a President, Secretary and two Vice-Presidents.

The current CIPM Membership[2] is as follows:

	Initial Election	Last Elected
President		
Dr W. Louw (South Africa)	15 May 2013	2018
Secretary		
Dr T. Usuda (Japan)	1 July 2012	2018
Vice-Presidents		
Dr J.K. Olthoff (USA)	16 November 2018	2018
Prof. J. Ullrich (Germany)	15 May 2013	2018
Other CIPM members		
Dr F.V. Bulygin (Russian Federation)	20 November 2014	2018
Dr I. Castelazo (Mexico)	20 November 2014	2018
Dr D. del Campo Maldonado (Spain)	16 November 2018	2018
Dr N. Dimarcq (France)	16 November 2018	2018
Dr Y. Duan (P.R. China)	8 March 2010	2018
Dr H. Laiz (Argentina)	7 December 2016	2018
Prof. T. Liew (Singapore)	20 November 2014	2018
Prof. P. Neyezhmakov (Ukraine)	16 November 2018	2018
Dr S.R. Park (Republic of Korea)	16 November 2018	2018
Dr M.L. Rastello (Italy)	7 December 2016	2018
Dr P. Richard (Switzerland)	20 November 2014	2018
Prof. G. Rietveld (Netherlands)	20 November 2014	2018
Dr M. Sené (UK)	7 December 2016	2018
Dr A. Steele (Canada)	16 November 2018	2018

[2] As of 15 November 2022.

CIPM Meetings

The CIPM has met seven times since the 26th CGPM:

- 111th meeting – June 2022 (hybrid)
- 111th meeting – Preparatory meeting March 2022 (on-line)
- 110th meeting – Session II – October 2021 (on-line)
- 110th meeting – Session I – June 2021 (on-line)
- 109th meeting – October 2020 (on-line)
- 108th meeting – Session II – October 2019 (in person)
- 108th meeting – Session I – March 2019 (in person).

It is worth noting that the last time the CIPM was able to meet fully in person was in 2019. From 2020 to 2022 the CIPM held on-line and hybrid meetings due to the restrictions introduced to combat the Covid-19 pandemic. Nevertheless, the CIPM has been able to progress, and I would like to thank everyone for their adaptability during challenging times.

Presidents of the Consultative Committees

The CIPM appointed and reappointed the Presidents of the Consultative Committees for 4-year terms at Session I of its 108th Meeting in March 2019. The current appointments are as follows:

- Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV): Dr H. Laiz
- Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM): Prof. G. Rietveld
- Consultative Committee for Length (CCL): Dr I.A. Castelazo
- Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM): Dr P. Richard
- Consultative Committee for Photometry and Radiometry (CCPR): Dr M.L. Rastello
- Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM): Dr S.-R. Park
- Consultative Committee for Ionizing Radiation (CCRI): Dr M. Sené
- Consultative Committee for Thermometry (CCT): Dr Y. Duan
- Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF): Dr N. Dimarcq
- Consultative Committee for Units (CCU): Dr J. Ullrich.

Honorary membership

In October 2019, the CIPM bestowed honorary membership on Dr Barry Inglis in recognition of his accomplishments as the President of the CIPM, which had an impact across the organization (Decision CIPM/108-37). He served as President of the CIPM for 8 years from 2010 to 2018, during which time he led the organization through three meetings of the CGPM. In addition, Dr Inglis led the CIPM through the governance review and subsequent launch of the reform of its processes. His efforts in coordinating the work of the CIPM with its Consultative Committees and the global NMI community culminated in the successful adoption of revised definitions for the SI units in 2018.

In memoriam: William R. Blevin

It is with great sadness that I note the passing of our former CIPM colleague and Honorary Member of the CIPM, Dr William R. Blevin on 11 August 2022 at the age of 92. He played a key role in preparing the redefinition of the candela by the CGPM in 1979 and co-authored the BIPM guidebook "Principles Governing Photometry". He was a member of the CIPM for 18 years, served as CCPR President from 1982 to 1994, CIPM Vice-President from 1992 to 1997, and CIPM Secretary from 1997 to 2000. He was the main author of the "Blevin report" on *National and International Needs relating to Metrology: International Collaborations and the role of the BIPM*, which was submitted by the CIPM to the 21st meeting of the CGPM (1999).

10.3 Actions arising from Resolutions taken at the 26th CGPM (2018)

Resolution 1 - On the revision of the International System of Units (SI)

The revision of the SI agreed at the 26th CGPM came into effect on 20 May 2019 (World Metrology Day). I am pleased to report that implementation was very smooth and well accepted world-wide. We now have a set of units that are decoupled from artefacts, and the metrology research community is already working on ways to exploit this new freedom, for example working towards realizing the unit of mass at a level much less than 1 kg, with the aim of driving down uncertainties at the micro and even nano level. There remains some very small dispersion at the highest level in the mass realizations. This does not cause any practical problems, but we look forward to the scientific work bringing convergence over the coming years.

Resolution 2 - On the definition of time scales

This Resolution called on all relevant unions and organizations to work towards a common understanding on reference time scales, so as to meet the needs of the current and future user communities, and to work together to improve further the accuracy of the prediction of UT1 - UTC and the method for its dissemination to satisfy the future requirements of users.

Over recent years the CCTF has focused its activities on preparations for the future definition of Coordinated Universal Time (UTC), the time scale maintained by the BIPM. Several decisions were taken, notably the establishment of a CIPM task group to support the preparation of the CIPM for the World Radiocommunication Conference in 2023 (Decision CIPM/108-40 (2019)).

I would like to emphasize the importance of maintaining momentum, and call on all Member States for their support to help ensure that multi-GNSS interoperability will be based on Coordinated Universal Time, so as to avoid the proliferation of international reference time scales.

Draft Resolution D "*On the use and future development of UTC*" and Draft Resolution E "*On the future redefinition of the second*" will be presented during the Conference.

Resolution 3 - On the objectives of the BIPM

We can report on the main objectives as mentioned in the resolution. SC 3 and SC 4 of the CIPM Sub-Committee on Strategy focused on two components in response to Resolution 3:

a) Responding to many resolutions of the CGPM that encourage the CIPM to seek broader membership for the organization, whilst reflecting on the fact that most if not all potential new Member States will be substantially below the minimum level of contribution:

- Responding to Resolution 5 (2011) for Intergovernmental Organizations.
- Preparing a summary of the present state regarding engaging with the treaty.
- Exploring alternative mechanisms to facilitate universal participation for future discussion.

b) Deepening of linkages with and among the Regional Metrology Organizations (RMOs), including addressing the challenge of National Metrology Institutes that are not officially aligned with any RMO.

Represent the world-wide measurement community

To meet efficiently and effectively the current and future scientific and societal challenges, the BIPM as the organization created by the States Parties to the Metre Convention, needs to constantly evolve towards better governance and to stay modern. As for membership of the organization, the current model accommodates just over 100 nations around the world that officially participate in the

coordinated activities towards a global measurement system. Although these nations represent nearly 98 % of world GDP, a further 83 UN Member States and other economies need to be accommodated in the official international measurement system to make it truly global.

The CIPM is presenting Draft Resolution F "*On universal adherence to the Metre Convention*", to the Conference to obtain a mandate towards a potential solution with appropriate consensus built that could be presented as a draft resolution to the 28th CGPM.

Be a centre for scientific and technical collaboration, measurement comparisons

In a world where quality infrastructure is increasingly prominent as an integrated approach to ensure interoperability, food safety, environmental protection, effective healthcare and law enforcement, partnerships with other international organizations are paramount for the BIPM to deal with the challenges.

Decision CIPM/109-15 (2020) The CIPM approved the Terms of Reference of a Joint Task Group between the BIPM (representing the States party to the Metre Convention) and the International Organization of Legal Metrology (OIML) with the aim to foster enhanced cooperation between the BIPM and OIML in order:

- *to facilitate both organizations in serving their Member States better.*
- *to make both organizations more attractive to states that do not currently participate in the activities of either/both organization(s).*

Dr Louw, Dr Milton and Dr Richard were appointed as the representatives of the BIPM in the Joint Task Group. Other CIPM members will be invited to join the task group as required.

Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT) activities

1. Capacity building aims to achieve a global balance between the metrology capabilities in Member States. Each of our capacity building initiatives is designed to meet the needs of the NMIs. The activities related to the CIPM MRA are already giving demonstrable and positive effects in the CIPM MRA processes. A number of new NMIs have taken on the role of piloting comparisons for the first time, or in some cases sharing the piloting role with an experienced NMI. Likewise, a new generation of RMO Technical Committee Chairs are beginning to emerge. The NMIs from Associates of the CGPM that had signed the CIPM MRA, but had been unable to progress with developing calibration and measurement capabilities (CMCs), successfully navigated the review processes and have had their first CMCs published in the Key Comparison Database (KCDB).
2. Knowledge transfer ensures that the work of the BIPM has the greatest impact. The knowledge transfer programme is widely welcomed and has become a pillar supporting NMIs in strengthening their laboratory capabilities.

Resolution 4 - On the dotation of the BIPM for the years 2020 to 2023

The CIPM has overseen the BIPM's budgets and financial performance, and successive Audit Reports for the years 2018-2021 contained no substantive qualifications. The BIPM has remained within budget and further steps have been taken to address future financial challenges associated particularly with the BIPM Pension and Provident Fund. This reflects, in no small way, on the competence and hard work of the BIPM Director and his staff.

Resolution 5 - On the financial arrears of Member States and the process of exclusion

In this Resolution it was decided that:

- the CIPM shall implement Article 6 paragraph 8 of the Annexed Regulations.
- the CIPM shall address the situation where historical practice has resulted in the accumulation of arrears.

This Resolution resulted in a revised policy related to the long-term accumulation of arrears and has been implemented through Decisions of the CIPM taken in 2019, 2020 and 2021, that will be presented in the report by the Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance.

In essence, the CIPM addressed the accumulated arrears in 2019. In 2020, the CIPM agreed the timetable proposed by the Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance to implement Resolution 5 of the 26th meeting of the CGPM (2018) and requested the Sub-Committee to continue to coordinate the needed CIPM actions to build a consensus amongst advancing Member States on the issue. In 2021 the CIPM acknowledged confirmation that, on the basis of the review by the Sub-Committee, the data for the accumulated arrears and associated advances prepared by the BIPM staff were complete and satisfactory. The BIPM then informed the States that have previously been notified of accumulated arrears exceeding the six-year period, of their financial situation.

Following these decisions, a correction needs to be added to the BIPM financial accounts after which the matter can be considered as closed.

I would like to record my thanks to the CIPM Sub-Committee on Finance, and Dr Philippe Richard in particular as well as the BIPM staff, who together spent a significant amount of time meticulously examining records going back more than five decades to ensure the CIPM was able to take the appropriate actions to resolve Resolution 5.

Progress related to Resolutions 1, 2 and 3 is detailed in the CIPM Strategy, the proposal for the BIPM Work Programme, and in the draft Resolutions to the 27th meeting of the CGPM.

10.4 Report on the actions taken by the CIPM towards a “CIPM Strategy 2030+”

The CIPM Sub-Committee on Strategy meeting in June 2019 included a background discussion that reflected on the profound change to the SI in 2018. The focus of the stakeholders in the SI, specifically the NMIs and DIs was to develop realizations of the units according to the defining constants. Discussions at the meeting started to develop a strategy for the long term. The topics under consideration were:

- What issues will scientific metrology have to address by 2030 and beyond?
- What disruptive technologies will shape our future?
- What will the organization look like in 2050 in order to address the landscape by that time?

The meeting had discussed the broader strategy, including the Metre Convention in 2030 and beyond, and how to identify and report on the long-term requirements in metrology. The members of the Sub-Committee had mentioned that the role and constitution of the Metre Convention and the organs it had established is unique and its contributions to the world-wide harmonization of measurement cannot be overestimated. Other issues discussed included whether the BIPM/CIPM serves all economies/NMIs as effectively as it should. The meeting also examined whether the BIPM liaises as efficiently as possible with other IGOs.

Following this meeting, the CIPM decided to expand the terms of reference of the CIPM Sub-Committee on Strategy to include advice to the CIPM on wider strategic directions of metrology as follows:

1. responding to the evolving needs for metrology.
2. addressing key scientific challenges to advance the global measurement system.
3. strategy for deepening engagement with other international organizations on measurement science issues.
4. reviewing the strategy for future membership of the organization.
5. modernizing the operations of the organization.

Points 1-3 are in direct response to CGPM Resolution 1 (2018).

Five Sub-Committees (SC1 to SC5) were set up to develop these themes and to draft reports that could be used to drive the development of the CIPM Strategy 2030+. Details of the outcomes of this work are available in the *Report on the actions taken by the CIPM towards a "CIPM Strategy 2030+"*.

SC1 identified three groups of drivers for future decision making globally, both technological and societal:

- Well-being: The health security and safety of a growing population with evolving social attitudes and values.
- Sustainability: Reduced human impact on the climate and management of natural resources.
- Enterprise: Digital innovation to increase prosperity, productivity, and growth and also to enable equality and fairness.

Whilst some aspects of the strategy are already being implemented, overall the aim is to be able to give a clear articulation of how the future might look at the 150th anniversary of the signing of the Metre Convention in May 2025, followed by appropriate proposals to the 28th meeting of the CGPM (2026).

1. Responding to the evolving needs for metrology

Five main evolving needs in metrology were identified; it is notable that these are expressed as 'Grand Challenges' rather than metrology area challenges:

- Climate change and environment
- Health and life sciences
- Food safety
- Energy
- Advanced manufacturing.

Together with two additional cross-cutting horizontal themes.

- Digital transformation
- So called 'new' metrology.

For each, actions are proposed to promote and enhance international cooperation in these areas. These topics are addressed in Draft Resolution A "*On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology"*."

The present CIPM structures, particularly the Consultative Committees that advise the CIPM, are organized and focused on 'vertical' metrological lines (for example, measurement of specific quantities/units or on unit definitions). The challenges identified above will require a new multidisciplinary approach that addresses these challenges in a more holistic way. Therefore, the CIPM proposes to create appropriate forums to shape and coordinate the metrology community's response to the identified grand challenges with the objective to coordinate new possibilities for metrology to have an impact on global cross-cutting challenges.

I would like to mention the two additional cross-cutting horizontal themes:

Digital Transformation

The world is amid a digital revolution that is challenging the metrology communities' working practices and paradigms for traceability and reproducibility. It presents challenges to both bring metrology to the digital world and to "digitalize" metrology, if the metrology community is to ensure consistency and confidence in measurement in this new world. There is a need for an internationally accepted and standardized infrastructure for the provenance of data, digital calibration certificates, accepted ontologies for machine-readable and machine-actionable information and data, and validation of artificial intelligence (AI) techniques such as machine learning. These should be embedded within international standards and created through cross-disciplinary and cross-sectoral collaboration.

The CIPM is at the forefront of global efforts to coordinate the digital transformation in metrology. It established a CIPM Task Group on the Digital SI to decide how to best provide the world with a machine accessible SI.

There have already been many activities associated with this fast moving and exciting transformation, notably the Task Group organized a virtual workshop entitled "The International System of Units in FAIR digital data" that brought together almost 1 300 participants from around the world to support the CIPM in its initiative to establish a Digital SI Framework.

"New" metrology

Metrological traceability is one of the key principles in metrology: "the property of a measurement result whereby the result can be related to a reference through a documented unbroken chain of calibrations, each contributing to the measurement uncertainty". This principle of metrological traceability has proven to be extremely influential. However, looking forward, several impending technological advances could have an important "step-change" impact on the way metrological traceability can be realized in the future. These include the use of sensor networks, distributed instrumentation, intrinsic measurement standards, advances in measurement science enabled by the redefinition of the SI and the implications of AI/big data.

These two "cross-cutting" challenges clearly overlap with each other and link with the first five grand challenges. The CIPM is already beginning to tackle the challenge of the digital transformation through the Task Group on the Digital SI and took several decisions that eventually led to the "Joint Statement of Intent on the Digital Transformation". To date, the Joint Statement has been co-signed by eight international organizations. Further details of the Joint Statement are given later in this report.

2. Addressing key scientific challenges to advance the global measurement system

The key scientific challenges to advance the global measurement system were identified and are articulated in terms of current and future actions to better realize the SI; there are two that could be described as the key scientific challenges for the SI:

- redefinition of the second – this is elaborated in Draft Resolution E.
- redefinition of the candela – the current definition meets current needs; this remains a challenge for the future.

Alongside the scientific challenges we see evidence of progress, which is to say the need to extend the range of prefixes in the SI, addressed in Draft Resolution C – On the extension of the range of SI prefixes.

3. Strategy for deepening engagement with other international organizations on measurement science issues

The CIPM concluded that the strategy for engagement with other IOs is mature and the CIPM oversight provides good governance.

- The BIPM International Liaison and Communication Department was strengthened to maintain the relationships and interactions.
- CIPM members were assigned to each strategic liaison to assist BIPM staff with the strategic interactions, and the liaison arrangements are being put into practice.

Since 2018, the CIPM and the BIPM staff continued to interact with other international organizations for whom metrology matters. The BIPM formalized its existing liaisons through agreements, arrangements, or memorandums of understanding with the following international organizations:

- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
- International Telecommunication Union (ITU)
- Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO)
- Committee on Data of the International Science Council (CODATA)
- International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC).

Joint Statement of Intent on digital transformation in the international scientific and quality infrastructure

In 2022 the *Joint Statement of Intent on digital transformation in the international scientific and quality infrastructure* was signed by the BIPM and the following organizations:

- Committee on Data of the International Science Council (CODATA)
- International Commission on Illumination (CIE)
- International Electrotechnical Commission (IEC)
- International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)
- International Measurement Confederation (IMEKO)
- International Organization of Legal Metrology (OIML)
- International Organization for Standardization (ISO)
- International Science Council (ISC).

The joint statement is part of an ongoing initiative by the CIPM and its Task Group on the Digital SI to develop and establish a world-wide uniform and secure data exchange format based on the SI. It provides a platform for the signatory organizations to come together to indicate their support, in a way appropriate to their particular organization, to the development, implementation, and promotion of the SI Digital Framework as part of a wider digital transformation of the international scientific and quality infrastructure.

OIML

A Joint Task Group between the BIPM and the OIML was set up with the aim of having a “single voice for metrology” and to foster enhanced cooperation between the two organizations. The Task Group met several times. The group consists of the CIPM President, BIPM Director, CIML President and the BIML Director. The two organizations collaborate in many ways:

- World Metrology Day, including the new initiative towards gaining recognition by UNESCO
- Joint development of documents, notably the “National Metrology Systems - Developing the institutional and legislative framework”

- Liaison activities
- Representation
- Operational and institutional matters
- Capacity building.

UNESCO

The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) Executive Board took a key step towards recognizing World Metrology Day at their session on 13 October 2022, following the proposal presented by Kazakhstan and supported by the BIPM and OIML. The decision will need to be ratified by the 42nd session of the UNESCO General Conference to be held in November 2023. If all goes to plan, UNESCO will proclaim 20 May of each year as a UNESCO world day which will then be celebrated every year from 20 May 2024.

The recognition of World Metrology Day by UNESCO will open new opportunities for the BIPM and OIML to promote World Metrology Day. It has already raised support from a number of UNESCO Member States that do not currently participate in BIPM or RMO activities. This stimulates opportunities for the BIPM to explore their participation within the context of the mission towards "Universal adherence" proposed in Draft Resolution F. It will also open the possibility for the BIPM to request part of its 150th Anniversary events in 2025 to be hosted at UNESCO and thereby opening it to a truly global audience.

ILAC

Interactions with ILAC focused on documents ILAC P10:07/2020 "ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results", ILAC P14:09/2020 "ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration" and ILAC G18:04/2010 "Guideline for the Formulation of Scopes of Accreditation for Laboratories".

The "Joint ILAC-CIPM Communication regarding the Accreditation of Calibration and Measurement Services of National Metrology Institutes" was updated and reaffirmed in 2020.

UNIDO

The BIPM contributed to the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) initiative and subsequent publication "Quality Policy Guiding Principles", which is aimed at facilitating the effective implementation of quality infrastructure (QI) in developing countries and to the methodology included in the UNIDO sponsored publication "Quality Infrastructure for Sustainable Development Index (QI4SD)", specifically related to benchmarking of individual QI dimension (metrology), which allows for continual improvement and mutual learning.

WTO

BIPM staff continued to represent the BIPM at the regular meetings of the World Trade Organization Committee on Technical Barriers to Trade (WTO TBT) and were also invited to speak in thematic sessions devoted to quality infrastructure and capacity building.

OECD

The BIPM continued to contribute to analytical work with the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) "Partnership for effective international rule-making" as the focal point of one of the working groups on international organization (IO) coordination and inclusiveness to ensure that the role of the world metrology system activities and structures are recognized as a critical part of the QI. The Director of the BIPM, together with the heads of other IOs, participated as a panellist in the OECD high-level events.

The OECD/BIPM joint study within OECD IO Partnership "The Case of the International Bureau of Weights and Measures" was published in February 2020.

UNFCCC

The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) admitted the BIPM as an observer to the COP27 (Conference of Parties) meeting held on 7-18 November 2022. Admission is a one-off process, thus following admission, the BIPM will be able to participate actively in future COPs without having to reapply.

INetQI (previously DCMAS Network)

BIPM staff are actively engaged in the International Network on Quality Infrastructure (INetQI). The network allows exchange between international and intergovernmental organizations (ten at the beginning) with the objective of promoting an effective metrology, accreditation and standards system in developing countries, and has made great progress in recent years. INetQI was expanded and currently has 14 members, including the newly joined Independent International Organisation for Certification (IIOC) and International Certification Network (IQNET). INetQI is currently looking to develop the concept of an INetQI "Single library" bringing together available resources for the QI community.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM)

The JCGM is chaired by the BIPM Director. The CIPM maintains representation on the JCGM and the current representative (Decision CIPM/108-17) to the JCGM and JCGM-WG2:VIM is Prof. P. Neyezhmakov.

The CIPM decided in October 2020 (Decision CIPM/110-2) to submit a vote to the JCGM "in favour" of the publication of GUM 6 (Guide to the expression of uncertainty in measurement - Developing and using measurement models).

The JCGM Working Group on the International Vocabulary of Metrology (JCGM-WG2:VIM) has carried out a considerable amount of work since 2018 towards the development of the next edition of the International Vocabulary of Metrology (VIM4), which is expected to be published in the near future.

Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM)

The International Council for Standardization in Haematology (ICSH) became an Executive Committee Member Organization of the JCTLM in December 2019, joining the BIPM, IFCC and ILAC. At its March 2019 meeting, the CIPM appointed two of its members as new representatives to the JCTLM Executive Committee: Dr T. Liew and Dr S.-R. Park.

The JCTLM database was updated with a new version that was launched on 1 October 2022. The replacement provides the database with an operating system that will be maintainable for the next ten years and which makes the database machine readable. On average one hundred entry nominations are received and reviewed each year for the database, with entries that meet JCTLM requirements being added to the database. The database currently contains 257 reference materials, 213 reference methods and 203 laboratory reference measurements services, which can be used by the *In Vitro* Diagnostic (IVD) industry to meet metrological traceability requirements.

The JCTLM held two member and stakeholder workshops in 2019 and 2021. The workshop in 2021 was held completely on-line, attracting some 500 participants from 65 countries, and leading to recommendations on overcoming challenges to global standardization of clinical laboratory testing: reference materials and regulations.

The JCTLM Secretariat, provided by the BIPM, has annual running costs that are supported jointly by the BIPM and IFCC. The funding agreement between the BIPM and IFCC is scheduled for renewal in 2023, and voluntary funds are being sought in 2022 to add a web-based nomination and review capability to the JCTLM database.

4. Reviewing the strategy for future membership of the organization

In the past two decades participation in the activities of the BIPM have grown significantly. States and economies with emerging metrology systems, often having very limited capabilities and resources, find the present options to participate are not appropriate for their needs (recalling that 'Associate' status is focused around CIPM MRA participation). It is time to examine the current application of Article III of the Metre Convention and how this Article might be applied in order to facilitate lasting and universal adherence to the Convention. This is addressed in Draft Resolution F "*On universal adherence to the Metre Convention*".

5. Modernizing the operations of the organization

Recent activities of SC5 included drafting the Rules of Procedure and the Code of Conduct for the CIPM. The CIPM approved edition 1.1 of the CIPM Rules of Procedure and the first edition of the CIPM Code of Conduct. As part of an overarching review, the CIPM undertook extensive discussions in 2019 on the independence and responsibilities of its members.

Acting on reports from the *ad hoc* State Representatives working group, the CIPM requested the BIPM Director to initiate the development of By-Laws for the BIPM and Peter Quayle, an international lawyer specializing in the law, governance, and jurisdictional immunities of international organizations, was contracted to start the process. By-Laws are a written governance instrument pertaining to the functioning of an international organization and complementary to its constituent instrument. It is the most suitable governance instrument found in many international organizations. Rules of Procedure are governance instruments too. They regulate in detail the functioning of an organ or body. In summary, By-Laws enhance the transparency, accessibility and modernity of governance of an international organization. The CIPM is seeking a mandate from the 27th CGPM to continue developing the By-Laws for presentation and approval at the 28th CGPM (2026). The Member States will be consulted extensively during further preparation of the By-Laws to ensure that they are included at all stages of the development process.

10.5 CIPM Consultative Committees

Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV)

The CCAUV met twice since the 26th meeting of the CGPM (2018). The group of metrologists within these areas represent a sparse and geographically dispersed community. Therefore, in addition to covering mutual recognition via comparisons and reviews, CCAUV meetings also provide a global forum to describe the latest research and demonstrate progress in the relevant fields; they allow the creation and maintenance of contacts with other specialists; and they facilitate discussions on current issues. The meetings also provide an opportunity for scientific exchange and thematic presentations on current leading-edge AUV metrology topics. Since the last CGPM, the liaison with the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) has been reinforced; one session of a CCAUV meeting was dedicated to the CTBTO and CCAUV experts participate in CTBTO technical meetings. A liaison between the joint WG ISO/TC 12 (Quantities and units) and IEC TC 25 (Quantities and units) has been formalized. This is a consequence of the strong collaboration between the CCAUV and ISO/TC 12 (and IEC TC25) for the revision of the ISO 80000

series in 2018-2019. The CCAUV reviewed its strategy to illustrate the present and future metrological needs for applications in AUV and to focus CCAUV activities. New areas of study and application have been identified such as acoustic spectroscopy, photoacoustic spectroscopy, lung sonography and digital transformation.

Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM)

The introduction of the revised SI on 20 May 2019 led to a step change of about 1 part in 10^7 for quantities related to voltage and of 2 parts in 10^8 for quantities related to resistance. The CCEM had published guidelines for use by NMIs and their customers on how to deal with these changes. The small changes did not lead to any problems in the stakeholder community. The second round of CCEM key comparisons is under way. The load of organizing key comparisons is increasingly shared amongst a group of NMIs, each of them being responsible for a specific aspect of the comparison. The CCEM is introducing a new scheme for organizing key comparisons (the star-scheme), which should lead to a significant reduction of the duration of comparisons. The CCEM has created a joint working group together with the CCRI to introduce a new generation of instruments for the measurement of low currents of ionization chambers. This would eliminate the need to verify the linearity of the presently used electrometers with sealed radioactive sources, which are difficult to obtain, and which can generate safety risks. In 2019 the CCEM organized a workshop on “Radiofrequency and microwave metrology – recent developments and challenges” with participation from industry and academia. In 2022 a new series of CCEM webinars on topics related to fundamental and applied electromagnetic metrology was launched.

Consultative Committee for Length (CCL)

Present activities of the CCL concern practical length and angle measurements (from one dimension to three dimensions, from sub-nanometre to tens or hundreds of metres) and future optical frequency standards (for metre realizations). Since the previous General Conference, the CCL has met once (3-year cycle) and its working groups have each met three or four times. Length CMCs registered in the KCDB as numerical equations are migrating to quantity equations as approved by the CIPM; about 850 CMCs are concerned. The CCL updated the *mise en pratique* document for the metre to include the Si lattice as a secondary representation of the metre, as suggested by the CCL Working Group on Dimensional Nanometrology (CCL-WG-N). The three existing methods of realizing the metre included in the document are time-of-flight of light radiation, laser interferometry (primary) and the Si lattice parameter (secondary). The CCL-CCTF Working Group on Frequency Standards (CCL-CCTF-WGFS) developed and approved the Guideline on the “CMCs on frequency stabilized lasers” and the technical protocol of the key comparison CCL-K11 on optical frequency and wavelength standards. A survey has been conducted to deal with the SI digitalized metre project and a Task Group has been constituted (CCL-TG-DIG) to collect and organize the data. A collaboration with the BIPM is under way to achieve the “digitalized SI metre”, which will allow users to obtain, in real time, the latest CIPM-approved values of frequency standards and other length-related parameters. The CCL Working Group on the CIPM MRA (CCL-WG-MRA) approved the guideline on the List of Good Practice guides and similar sources of information in length metrology and on the revision to the coding scheme used for numbering comparisons undertaken in the CIPM MRA. The CCL worked on the publication of the *Metrologia* Focus Issue on Length; 15 papers have already been published and two others are under revision. In the period since the 26th meeting of the CGPM (2018) the list of optical frequency standards used for the realization of the definition of the metre and the secondary representations of the second has been updated by the WGFS and adopted by the CIPM after approval by the CCTF. A formal liaison between the CCL and ISO/TC 213 (Geometrical Product Specification) has been formalized.

Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM)

Two CCM meetings were held during the period 2019-2022, one on 16-17 May 2019 and one on 20-21 May 2021. A workshop on new activities and developments was organized during the meeting in 2019. A detailed note on the phases for the dissemination of the kilogram was approved and the progress of the tasks following this detailed note was reviewed at the meetings. Other major decisions of these two meetings include the merging of two WGs and the formulation of a CCM request to the JCRB about the possibility of adding an explanatory note for clarifications on "Appendix A1 in CIPM-MRA-P11". Regarding the redefinition of the kilogram, the first key comparison of realization experiments CCM.M-K8 was completed in 2019. Mass dissemination from the Consensus Value of the kilogram came into force on 1 February 2021 and the CMCs of 31 NMIs were adjusted in the KCDB. The second key comparison of kilogram realizations was launched in late 2021 and the draft A report is being circulated. There were seven participants in the first comparison and nine in the second. A completely revised version of the CCM Strategy 2022-2032 was produced by the CCM Working Group on Strategy and MRA coordination (CCM-WGS). Two CCM Guidance documents on comparisons were revised. The approval process for comparison reports has been simplified to accelerate the publication of comparison results. Specific guidance documents for an "efficient and effective" approach to CMC review exercises have been established in some WGs and are being developed in others.

Consultative Committee for Photometry and Radiometry (CCPR)

CCPR members contributed to the finalization of key documents related to the Candela definition and its *mise en pratique*. Work towards a future redefinition of the candela was reported and "Key Scientific questions of the SI unit of luminous intensity, the candela" was presented to the 25th CCU (2021). In addition the CCPR has worked on the definition of a longer-term strategic objective to implement a scientifically rigorous photometric system based on cone-fundamentals to provide a new link between photometric and radiometric quantities.

The CCPR discussed the adoption of a risk-based approach for reviewing requirements and provides further guidance regarding the scope of Key Comparisons in terms of CMC support ("how far the light shines"). Flowcharts and checklists are included to ensure all requirements are clear and aid reviewers. The CCPR collaborated with the WMO to ensure the traceability of irradiance measurements to the SI.

Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM)

Meetings of the CCQM and its WGs for 2020 to 2022 were held on-line with 194 on-line meetings hosted by the BIPM Headquarters, including the 26th and 27th plenary meetings. The revised CCQM strategy document and technical plans for working groups for 2021-2030 were published on 21 June 2021. The comparisons organized by the CCQM continued throughout the period, with 50 new comparisons initiated and 47 final reports published. The CCQM reacted quickly to support SARS-CoV-2 measurement responses at NMIs. Two comparisons were organized, and a series of webinars and workshops resulted in the publication of the "CCQM roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response".

The CCQM promoted stakeholder engagement through task groups, including for: Ozone absorption cross-section change implementation; Standards for the greenhouse gas emissions monitoring community; and Microplastic Measurements and Standards. A series of on-line stakeholder workshops were organized in emerging areas including: Microplastic Measurements and Standards; Particle Metrology; Metrology for viral systems as metrology tools; Use of Mass Spectrometry in Radionuclide Metrology (with the CCRI); and The metrology of quantities which can be counted (with the CCU).

Consultative Committee for Ionizing Radiation (CCRI)

The CCRI Radionuclide Therapy and Quantitative Imaging Working Group (CCRI-RTWG) was formed to bring together metrologists and stakeholders from the medical community to address measurement issues in the rapidly developing fields of radionuclide therapy and quantitative nuclear imaging. A new Task Group, the CCEM-CCRI Task Group - Low Current Measurement (CCEM-CCRI-TG-LCM), was created to collaborate with the CCEM to harness developments in low current metrology to improve measurements with ionization chambers, which are used widely in medical and radiation protection applications.

The CCRI has been working with the CCQM to understand how developments in metrology for Mass Spectrometry can be applied to its increasing use for low-level (for example environmental) and long-lived (for example nuclear waste and forensics) radionuclides. The constraints on working due to the Covid-19 pandemic during this period catalysed the development of new virtual mechanisms for communication and involvement with the ionizing radiation community. These included a series of webinars that have brought together stakeholders and metrologists from across the globe with a total of 1 277 individuals from 89 states and economies participating in 17 webinars. The CCRI Communication Working Group (CCRI-COMWG) has been set up to ensure these and other mechanisms (in person and virtual) are used to support the CCRI aims.

Consultative Committee for Thermometry (CCT)

The influence of the redefinition of the kelvin (K) and the associated MeP-K-19 is increasingly being felt by stimulating long-term research into primary thermometry approaches for temperature realization and dissemination. In particular, the different primary instruments developed for the determination of the Boltzmann constant are now being used to measure thermodynamic temperature over a wide range of temperatures to determine the difference between thermodynamic temperature to the present temperature scale ITS-90. There has been significant growth in novel photonic, self-validating and practical primary thermometry approaches – all of which could change the approach to temperature dissemination in the long term. All the measurement areas covered by CCT (temperature, humidity and thermophysical quantities) are profoundly cross-cutting and contribute to all the seven key priority areas identified in the CIPM document namely: climate change and environment, health and life sciences, food safety, energy, advanced manufacturing, digital transformation and “new” metrology. Recent examples are work to improve fever screening on a global basis during the recent Covid-19 pandemic and strong engagement with the meteorological community to improve traceability of the “Essential Climate Variables” such as air temperature and humidity.

Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF)

The CCTF has focused its activities on four “hot topics” that will require decisions in the coming years. These topics are:

1. the redefinition of the SI second based on an optical transition.
2. a revision of the leap-second procedure to realize a continuous UTC.
3. the requirements for supporting the traceability to UTC through GNSS measures.
4. the establishment of a capacity building project based on shared resources with the NMIs, and with the sponsorship of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society (UFFC), to transfer the technology allowing the realization of a local robust UTC(k) time scale, and a more widespread involvement in the generation and dissemination of UTC.

A *Metrologia* Focus issue is being prepared to address these topics. The CCTF developed two draft resolutions for presentation to the CGPM in November 2022, namely Draft resolution D: *On the use*

and future development of UTC and Draft resolution E: *On the future redefinition of the second*.

Consultative Committee for Units (CCU)

Following the introduction of the revised SI on 20 May 2019, the CCU organized a survey amongst NMIs, its liaison organizations and teaching organizations about the impact of the redefinition. None of the NMIs reported difficulties in implementing the revised SI and all felt that sufficient information had been provided. A number of possibilities for innovative technologies were reported. In general, the liaison organizations of the CCU were sufficiently informed about the changes and the majority reported that they had been adequately consulted. During the preparation of the 9th edition of the SI Brochure questions arose about the definition of some core metrological terms such as “quantity” and “unit”. The CCU created the CCU Working Group on Core Metrological Terms (WG-CMT) with the objective to propose definitions for such terms that underpin machine actionable services in metrology for the Quality Infrastructure.

The CCU recognized that the present treatment of units for angles in the SI can lead to questions. The majority of its members support the present approach for the radian being introduced as a derived unit. The CCU Task Group on angle and dimensionless quantities in the SI Brochure (TG-ADQSIB) has been created to improve the clarity of the sections on angle units in the Brochure.

The CCU has prepared Draft Resolution C for the 27th CGPM (2022) on the extension of the range of SI prefixes to take into account the needs of data science to express large quantities of digital information. The CCU is following the preparations by the CCTF for the planned redefinition of the second. In 2019 a workshop on “Advanced time and frequency transfer: the ultimate frontier for remote comparison methods” was organized.

10.6 CIPM MRA

The CIPM MRA is highly valued by Member States and continues to be a major responsibility for the BIPM. Currently a total of 250 institutes participate in the CIPM MRA. These comprise 97 National Metrology Institutes, plus a further 149 Designated Institutes, from 64 Member States and 36 Associates, along with four International Organizations: European Space Agency (ESA), International Atomic Energy Agency (IAEA), Joint Research Centre (JRC), and World Meteorological Organization (WMO).

Key Comparison Database (KCDB) 2.0

The new version of the KCDB, the KCDB 2.0, launched on 29 October 2019, offers a collaborative web platform for editing and reviewing CMCs, as well as extended search facilities. The new platform enables the submission, review and publication of CMCs, as well as comparison registration and updates in all metrology areas. It provides statistics, which can be tailored to a targeted RMO, country or metrology area.

A further enhancement to the KCDB 2.0 was made with the launch in 2021 of an Application Programming Interface (API), which allows automated searching for CMCs. The API KCDB provides data in response to search queries on CMCs. The API represents the first practical step on the road towards digital calibration certificates and lays the foundation for future developments, and ultimately new NMI digital services.

Maintenance of the KCDB represents an ongoing workload for the BIPM with more than 25 000 CMC entries and 1 700 comparisons in the KCDB.

GULFMET

The CIPM decided (Decision CIPM/110-13), based on the criteria it set, to admit the regional metrology organization Gulf Association for Metrology (GULFMET) as a full member of the JCRB in 2021, with a voice and the right to vote following JCRB Recommendation JCRB/43-1 (2021). GULFMET had previously been provisionally recognized by the JCRB as an RMO since 2015

All regions of the world now have a fully established RMO.

10.7 Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT)

The BIPM Capacity Building and Knowledge Transfer Programme aims to increase the effectiveness with which Member States and Associates engage in the world-wide coordinated metrological system. The CBKT Programme is constantly evolving to meet the needs of NMIs and DIs of Member States and Associates. It now offers a wide range of delivery options including, but not limited to: workshop-based activities organized at the BIPM Headquarters and at NMIs, usually in consultation with the RMOs; remote-learning on-line activities (on-line short courses, on-line technical exchanges and e-Learning platform); placements organized at the BIPM laboratories and at partner NMIs; and knowledge transfer publications, such as brochures. The programme initiatives are open to all countries with and without a well-developed metrology infrastructure.

The Covid-19 crisis accelerated the strategic plan to offer remote-learning opportunities for the NMIs and DIs. After the implementation of remote-learning in the form of short courses and technical exchanges implemented in 2020, the BIPM took a further significant step in 2021 by developing of a bespoke e-Learning solution with the interactive learning material on the CIPM MRA and scientific activities of the BIPM. In 2022, the BIPM e-Learning platform was further expanded to host learning material from RMOs. The platform is accessible around the clock on any mobile device to provide learning support to metrologists as conveniently as possible.

10.8 Looking to the future

To meet efficiently and effectively the current and future scientific and societal challenges, the BIPM needs to constantly evolve towards better governance to remain relevant and at the cutting-edge of metrology in the modern world. What issues will scientific metrology have to address by 2030+? What disruptive technologies will shape our future? How will the organization have to adapt to address the future landscape?

And how can we support the major challenges our societies are facing in, for example, ensuring good health and food quality, tackling climate change, and moving towards a sustainable energy infrastructure?

In a world where quality infrastructure is increasingly prominent as an integrated approach to ensure interoperability, food safety, environmental protection, effective healthcare and law enforcement, the creation of partnerships with other international organizations is paramount for the BIPM to deal with the challenges.

These are the concepts the CIPM is considering in its development of a broad strategy for the future – that needs to be distilled down to a focused and practical implementation plan – at least for the foreseeable future. The main focus over the next four years will thus be to develop the Strategy to be presented at the celebrations to mark the 150th anniversary of the signing of the Metre Convention on 20 May 2025, with the aim of publishing the final version in 2026. This will lead to a new vision and mission for the BIPM, to be presented to the 28th meeting of the CGPM.

Broad consultation is planned towards a way to enlarge engagement in the organization that would make it truly universal, with appropriate consensus built, that could be presented as a draft resolution to the 28th CGPM on how to accommodate those UN Member States and other economies that do not currently participate.

The CIPM, will continue to develop rules of procedure for the organs of the organization and a set of By-laws in accordance with modern practice within international organizations. This includes closely working with Member State representatives towards clarity on the nomenclature used internally and externally, to reflect the universal nature of the organization.

10.9 Conclusion

The period 2020 to 2022 posed unprecedented challenges to the CIPM and indeed the whole Organization. Reflecting back, the CIPM and staff of the BIPM, the NMIs and DIs and the Regional Metrology Organizations were able to continue the unification of the international system of units. The BIPM and NMIs could react to the measurement needs as a crucial tool in the fight against the Covid-19 pandemic. The reports from NMIs at the Director's meetings in 2020 and 2021 showed how NMIs, at very short notice, assisted with measurements and reference materials needed to monitor the pandemic and to develop vaccines. Measuring instruments and lifesaving equipment such as ventilators were developed. Meetings continued on-line and the comparisons of national measurement standards proceeded. The CIPM consolidated the reports of these actions on the BIPM website and this stands as a testimony of the resilience of our organization and its Member State's and the Associate's metrology institutes. As the pandemic was slowly brought under control and some normality returned, new challenges emerged in 2022 that will further stretch the resolve of the Organization. The actions and successes of the period 2019-2022 reported here and further during this Conference, shows that the BIPM and the greater measurement system has the resolve to endure and continue the global unification of the international measurement system under the International System of Units (SI). It was a privilege for the CIPM 2018-2022 to serve the Organization and we will fully support the representatives of our community that the CGPM elects to the CIPM in 2022."

The President of the CGPM thanked Dr Louw for his comprehensive report, commenting that it presented a number of remarkable achievements and many possible future actions with a clear vision for the work to be done.

The BIPM Director made two observations. He said that as of 15 November 2022 there were 64 Member States. However, the number of Member States at the time of the last CIPM meeting in June 2022 was 63 and was the figure that the CIPM referred to when some of the documents were prepared for the Conference. Therefore any documents that refer to 63 Member States are not erroneous, they simply reflect the number at the time of their preparation.

He added that there had been 93 on-line participants in the first session of the Conference and thanked the delegates for approving the Special Procedure, which allows the activities and discussions at the Conference to be shared with a much wider audience, including many of the extended delegations who are watching remotely. This is in the spirit of modernization that was mentioned by the CIPM President.

Second session – 15 November 2022 (afternoon)

The President of the CGPM welcomed the delegates to the second session.

11. Report by the Director of the BIPM "Highlights from the Work Programme"

Dr Milton's presentation focused on the highlights of the work programme that had been agreed at the last General Conference. He recalled that the main topic at the 26th meeting of the CGPM (2018) had been the redefinition of the base units of the International System of Units (SI) and as such, his presentation started with the activities most directly associated with the new definitions, namely the work in the Physical Metrology Department linked to the realization of the kilogram.

The Physical Metrology Department organized and participated in the two key comparisons of kilogram realizations: CCM.M-K8.2019 and CCM.M-K8.2021 using the BIPM Kibble balance, as planned in the Work Programme for 2020-2023. The BIPM Kibble balance continues to operate with a standard uncertainty of 41 μg at 1 kg (4.1×10^{-8}), which is better than the target of 50 μg at 1 kg. The department continues to offer mass calibrations and other services, with 87 % of Member State NMIs having received mass calibrations since 2012. The Physical Metrology Department has continued to make progress with the transportable quantum standards for on-site comparisons. The department tested two types of graphene quantum Hall resistance (QHR) samples and satisfactory performance has been confirmed at target operational parameters of 4.2 K and 3.5 T. The use of graphene is expected to facilitate the development of quantum standards that are easier to transport, with reduced operating costs and without the use of liquid cryogens. The department is developing a new comparison scheme for AC voltage in association with a number of NMIs. A total of 86 % of Member State NMIs have used the electrical measurement services since 2012.

The Director presented the progression of participation in primary realizations of the second from 2018 to 2022 via a graph of the monthly computation of UTC. Monthly computation of UTC in 2018 included contributions from caesium beams, caesium fountains and a rubidium fountain: the first results from optical clocks were received during the year. In 2022, five optical clocks contributed regularly to the computation of UTC, demonstrating the possibility that a definition of the second can be developed based on optical clocks. The calculation of UTC is becoming more accurate and resilient. The BIPM took over the responsibility for computing UTC from the *Bureau International de l'Heure* (BIH) in 1988 and the number of laboratories contributing to UTC has grown to around 90 in 2022. Accuracy of UTC improved from 10^{-13} in the 1980s to the current level of 10^{-16}. Further improvements in accuracy are anticipated as the availability of optical clocks increases. NMI participation in UTC computation increased during the Covid-19 pandemic despite fears that it may have been impacted negatively. This effort to maintain UTC during the crisis is a clear demonstration of its resilience. The Director thanked the NMIs for prioritizing their participation in UTC during the pandemic.

The Ionizing Radiation Department is upgrading and extending its dosimetry capabilities. It has moved some of its services towards the use of external facilities to reduce the duplication of facilities in the BIPM laboratories. At the 26th meeting of the CGPM (2018), it was reported that the department had launched a calibration service for secondary standards for NMIs/DIs in high-energy x-ray beams (6 MV - 18 MV) at the DOSEO facility in Saclay (France). A full range of services are now available. The department is setting up a ^{137}Cs beam calibration facility for occupational exposure measurement

with the IAEA in Vienna (Austria). An agreement has been signed with the IAEA and the occupational exposure comparison and calibration services will start in 2023.

New and improved radionuclide services are being offered including the extension of the International reference System SIR (ESIR) to cover β-emitters based on the TDCR instrument at the BIPM Headquarters. A successful pilot study has been carried out using ^{60}Co with 13 participants. The system is ready for high-energy beta-emitter comparison services. The first successful remote comparisons using the SIR Transfer Instrument (SIRTI) for short-lived radionuclides have been carried out at the PTB (Germany) and KRISS (Republic of Korea). The BIPM is supporting RMOs in the development of copies of the SIR, which would then be compared with the instrument at the BIPM Headquarters. This would allow regional comparisons of short-lived radionuclides to be carried out using the SIR copies. A total of 76 % of CCRI members and observers have participated in Ionizing Radiation Department comparisons.

The Gas Metrology section of the Chemistry Department has set up the only facility in the NMI community for making absolute measurements of carbon dioxide. This facility has been extended to provide isotope-ratio reference measurements that will deliver information about the source of the carbon dioxide in the atmosphere and where it is being absorbed as a sink. In addition, the department has been working on different traceability schemes for carbon dioxide and has contributed to the global isotope ratio measurement community.

The Organic Analysis section has been developing reference methods for pure and solution mycotoxin standards. Purity evaluation and calibrant assessment guidelines were published in 2022 for patulin and deoxynivalenol. In addition, the department supports the development of certified reference materials (CRMs) at NMIs. The department provided support for a comparison of Covid-19 diagnostic measurements in the NMI community at short notice. The comparison, CCQM-P216: SARS-CoV-2 Monoclonal Antibody quantification, was coordinated by NIM (China), NRC (Canada) and the BIPM. This marked the first time the CCQM community has carried out a comparison of a protein as large as SARS-CoV-2 monoclonal antibodies, with a molecular weight of 150 kDa. The comparison programme in support of diabetes diagnostics and treatment continued with comparisons on glycated and non-glycated haemoglobin hexapeptide pure standards (CCQM-K115.c) and was completed and published in 2022. A total of 89 % of CCQM members and observers have participated in Chemistry Department comparisons.

The Chemistry Department has continued with the transition from secondment knowledge transfer activities to on-line courses following the travel restrictions imposed during the Covid-19 pandemic. The training material that would have been used in the laboratory to train visiting scientists has been reformatted and made available via the BIPM e-Learning platform. On-line courses for FTIR for Gas Standard characterization were completed by scientists at NIMT (Thailand) and NMISA (South Africa) and new FTIR facilities became operational at both NMIs in 2022. An on-line course for organic analysis for CRM characterization received over 100 subscriptions in 2021. In both cases, the participants have been given the opportunity to participate in a comparison following completion of the courses to demonstrate that the knowledge transfer was successful and has been put into practice in an effective way.

The BIPM Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT) activities continue to expand since their initiation in 2014. The NMI community has continued and broadened its support to the programme; the Director thanked the NMIs and RMOs for their support. The CBKT programme has been successful, with almost 3 000 NMI/DI participations in its activities since they started. The CBKT courses were originally conceived to be delivered in-person at the BIPM Headquarters. Recently, many courses have been moved to on-line delivery, which has increased participation. In addition, some of the capacity

building activities are delivered at third-party sites and the Director particularly thanked TÜBITAK UME (Türkiye) for hosting a series of capacity building placements with input from the BIPM.

The BIPM has continued to modernize its communications activities. The new BIPM website was launched in April 2021 and now includes 26 023 working documents, 10 074 individual user accounts and received 40 800 visits in October 2022. The new version of the key comparison database (KCDB 2.0) went live on 29 October 2019 and has been fully implemented. One of the motivations for revamping the KCDB was to simplify some of the processes of approving CMCs under the CIPM MRA. The time required for inter-regional review of CMCs has been reduced by a factor of two since the implementation, demonstrating the success of the new version of the database. The same technology used for the KCDB 2.0 has been applied to the new version of the Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM) database, which went live on 3 October 2022.

The BIPM has been active in the area of communication and liaison with international organizations, particularly the promotion of metrology to external communities. The BIPM and the World Meteorological Organization (WMO) held a joint workshop 'Metrology for climate action' in September 2022. The workshop had 1 078 on-line participants and was intended to develop a consensus plan of metrology priorities between the WMO and NMI communities. This was the third joint workshop between the two organizations. On 6 November 2022, the BIPM was admitted as an observer organization to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) by the 27th session of the Conference of the Parties (COP27) held in Sharm-El-Sheikh (Egypt). This opens the opportunity to submit papers and information to future COP meetings from the CIPM Horizontal Forum on 'Environment and Climate'.

The theme for World Metrology Day 2022, which is held annually on 20 May, was 'Metrology in the digital era'. The poster was designed by the National Scientific Centre "Institute of Metrology" (Ukraine) in association with COOMET. The BIPM has been pressing for more recognition of World Metrology Day, particularly as an official 'World Day' by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). To obtain recognition by UNESCO requires a diplomatic process to be followed that involves consensus by its 190 Member States. On 13 October 2022, the UNESCO Executive Board took a key step towards recognizing World Metrology Day as a UNESCO event. The proposal was formally presented by Kazakhstan and supported by the BIPM and OIML. Written support for the initiative was received from 42 UNESCO Member States, including ten states that do not participate in the activities of the BIPM as Member States or Associates. It is anticipated that formal recognition will be granted in 2024. The Director acknowledged the support provided by the Kazakhstan embassy in Paris during the application process.

The BIPM has continued its liaison work with the international quality infrastructure community. The BIPM collaborated with the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) on the report "Quality infrastructure for sustainable development". The BIPM and OIML worked on the joint document "National metrology systems: developing the institutional and legislative framework" in response to a request at the 26th meeting of the CGPM (2018) for the two organizations to work more closely together. This document is central to the work of the OIML and the collaboration marks the first time it has been published as a joint document. The BIPM and Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) have worked together on their 'International Regulatory Co-operation and International Organisations' initiative, culminating with the report "The Case of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM)". The case study focuses on the role of the CIPM MRA in the international regulatory system. The OECD has agreed to support an economic study on the impact of metrology, which will be carried out by the OECD. The BIPM and the International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) have worked together to produce a guidance document on the future of a continuous universal coordinated time system

"Report ITU-R TF.2511-0, Content and structure of time signals to be disseminated by radiocommunication systems and various aspects of current and potential future reference time scales, including their impacts and applications in radiocommunication." This work followed the signing of a Memorandum of Understanding between the BIPM and ITU in June 2020.

The BIPM has made progress with the digital transformation, with the first high-profile event being the workshop "The International System of Units (SI) in FAIR digital data", which was held on 22-26 February 2021. This workshop attracted 600 participants and engaged the metrology community with the CIPM's proposals for an SI Digital Framework. The BIPM launched a survey to assess the interest and immediate targets for digital transformation among the NMIs that participate in the CIPM Consultative Committees. The survey found that 56 % of all responders have at least one digital project or are planning to start one. A total of 67 % of responders are working on digital calibration certificate (DCC) projects, however only 15 % of these were able to articulate how metrological traceability to the SI could be addressed in a DCC. A consultation version of the survey report "Evaluation report survey on digital transformations" was made available on the BIPM website in November 2022. The BIPM has transformed two of its digital services by developing Application Programming Interfaces (APIs); one for the KCDB and one for the Time Department database. These APIs allow direct machine-readable access to the databases and feedback from users has been positive. The BIPM has developed a prototype digital comparison report in the Ionizing Radiation Department and feedback on its usefulness is being sought from the CCRI community. A high-priority action within the implementation of the broader SI digital framework is the development of the "the unique SI reference point". This reference point is a structured database that can be interrogated by all users in a variety of input formats. It will be fully compliant with the findable, accessible, interoperable, reusable (FAIR) principles and will meet the digital needs of the community that uses the SI Brochure. The intention is that the unique SI reference point will replace the current tendency for users to access sources such as Wikipedia as the reference for the SI.

The Director congratulated three staff members who have recently received major awards and prizes. Dr Tavella received the Enrico Fermi Prize (Italian Physical Society) and the European Frequency and Time Award (European Frequency and Time Forum, EFTF), Dr Petit received the Marcel Ecabert Award (EFTF), and Mr Henson won the Wildhack Award (NCSLI). Two new Department Directors have been recruited since the 26th meeting of the CGPM: Vincent Gressier as the Director of the Ionizing Radiation Department since August 2021 and Anna Cypionka as Director of the International Liaison, Communication and Strategy Department from 1 January 2023.

The Director gave a summary of key facts and figures for the BIPM covering the period January 2019 to October 2022. The BIPM Headquarters has 69 staff, of whom 23 have PhDs. A total of 640 "days" of meetings have been hosted, involving 20 410 participants. Of the 419 calibrations that were carried out, 405 calibration certificates and 14 study notes were issued. There were 687 NMI/DI participations in BIPM comparisons. CBKT participation totalled 2 692, consisting of 47 laboratory-based knowledge transfer participants, 174 in capacity building workshops and 2 471 on-line participations. The CBKT participants came from 125 countries. The BIPM e-Learning initiative has attracted 670 users from 115 countries. The initiative includes 16 e-Learning courses from the BIPM and four from the RMOs.

The President thanked the Director and invited questions and comments.

Dr Laiz (Argentina) thanked the Director for the presentation and stressed the importance of the unique role played by the BIPM Kibble balance in the comparison of primary realizations of the kilogram. Many Member States do not have a primary realization and rely on the BIPM Kibble balance to provide traceability to the fundamental constants with no restrictions. The Director said that the BIPM

participates in the key comparison of kilogram realizations using its Kibble balance and the end point is a Key Comparison Reference Value (KCRV), which is embedded in the calibration artefacts used at the BIPM Headquarters. Member States can access the new definition of the kilogram via this route while Phase 2 of the implementation of the new definition of the kilogram is under way.

A member of the Slovakian delegation asked if the BIPM has any plans for measurements in the area of fusion energy. The Director replied that there are no immediate plans, however due to the importance of measurements to support fusion energy, this should be included in the CIPM's long-term vision for the BIPM that will be announced in 2025.

12. Introduction to Draft Resolution A "Evolving Needs in Metrology"

Prof. Rietveld and Dr del Campo Maldonado presented Draft Resolution A "*On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology"*."

Prof. Rietveld recalled that 20 years ago the CGPM had invited the CIPM to produce an overview of the evolving needs in metrology. The Blevin report 1998, and the Kaarls reports of 2003 and 2007 gave an outline of the long-term national and international needs relating to metrology, and how these can be met through international collaboration, and an outline of the unique role that the BIPM can play in meeting these needs. The Blevin and Kaarls reports played an important role in steering international metrology and stimulated international cooperation. Following the revision of the SI in 2018, the CIPM considered that there was a need to re-evaluate these reports, particularly what changes and challenges in society and economies are creating new needs for metrology and how the CIPM can best respond to ensure that metrology remains relevant in the 21st century.

In the 20th century, the needs in metrology were related mainly to technical disciplines, reflected at the CIPM level in discipline-based Consultative Committees. Metrological needs in the 21st century are notably different in character: they are triggered by regional or even world-wide challenges; linked to rapid technological developments (for example the "digital revolution"); and are "horizontal" in nature, requiring cooperation of many metrological disciplines to provide a solution to the challenges.

Prof. Rietveld said that the CIPM had identified five "Metrology Grand Challenges": climate change and environment; health and life sciences; food safety; energy; and advanced manufacturing. In addition, there are two cross-cutting challenges related to how measurements are made: digital transformation; and "new" metrology (for example sensor networks and NMI-on-a-chip). He added that some of the challenges, such as climate change, are not a single discipline and will require the cooperation of many disciplines to respond to the challenge. In the energy area there is a move towards the development of more sustainable energy supplies, including a shift from carbon-based to renewable energy sources. Sustainable energy may be produced in remote areas, requiring transport to the areas where it is needed using electricity grids (see §47). The associated metrological challenges include evaluating the efficiency of photovoltaic panels and wind turbines and improved monitoring of electricity grids. In the area of monitoring transmission grids, there are many metrological challenges including the increasing use of digital instrumentation, micro grids, and links between electricity, gas, heating and cooling grids. The electricity grid can no longer be considered as a single entity; the situation is becoming more complex with the development of technologies such as "digital twins", which allow a digital copy to be used to evaluate how grids would react under different scenarios to ensure the reliability of transmission grids as part of the critical infrastructure. These trends and the associated challenges prompted the CIPM to ask as how metrologists can contribute and how the CIPM can promote the critical role of the BIPM and metrology at the international level.

The CIPM has developed two proposals for how to move forward to meet the challenges arising from the evolving needs in metrology. The first is to create appropriate forums to shape and coordinate the metrology community's response to the identified grand challenges with the objective to coordinate new possibilities for metrology to have an impact on global cross-cutting challenges. The second is to start to develop a new vision for the work of the BIPM that builds on the CIPM report on the "Evolving Needs in Metrology", that should be the subject of a consultation with the global metrology community before the 150th anniversary of the BIPM in 2025 and for publication before the 28th meeting of the CGPM, planned for 2026.

Prof. Rietveld presented the text of Draft Resolution A. He noted that the Resolution recalls three previous resolutions that underline the relevance of these forward-looking exercises (CGPM Resolution 2 (2007), CGPM Resolution 1 (2018) and CGPM Resolution 3 (2018)). Draft Resolution A acknowledges the relevance of the SI in addressing the evolving needs in metrology, the critical role of metrology in addressing global challenges and the increasingly multidisciplinary nature of measurement in new or disruptive technologies. The resolution calls on the CGPM to encourage the CIPM to: develop a long-term vision for an international measurement system that will remain relevant and adequately address new metrology challenges; establish inter-disciplinary "horizontal" groups that will address these new challenges; and outline a new vision for the BIPM that builds on the CIPM report on the "Evolving needs in metrology". He invited the Member States to support Draft Resolution A and added that the CIPM would like to initiate some of the inter-disciplinary "horizontal" groups as soon as possible to start addressing the challenges and provide input into the development of the long-term vision for the BIPM.

Dr del Campo Maldonado returned to the "Metrology Grand Challenges" saying that the CIPM had decided to establish a Sectorial Task Group on Climate Change and Environment given the urgency to act on this theme. The objectives of the Sectorial Task Group are to advise the CIPM on all matters that influence metrology in the field of climate change and environment, including the BIPM Work Programme and its technical activities. It will provide inputs to the CCs to help shape their strategies and activities, including suggestions for international comparisons and will liaise with relevant forums organized by the RMOs.

Dr del Campo Maldonado gave a summary of the Metrology for Climate Action Workshop, which was hosted by the BIPM and World Meteorological Organization (WMO) on 26-30 September 2022. The on-line workshop attracted around 1 000 scientists from around the world who came together to identify the requirements for further developments in metrology to support adaptation to and mitigation of climate change. The main output of the workshop is a set of recommendations on the key technical challenges that the metrology community should tackle. These will set the agenda for measurement services and research in metrology in support of the Environment and Climate for the next ten years.

The President thanked Prof. Rietveld and Dr del Campo Maldonado.

13. Metrology for Climate Action: agreed outcomes and next steps from the WMO-BIPM Workshop

Dr Anthony Rea, Director, World Meteorological Organization (WMO) Infrastructure Department, gave an invited presentation entitled "Metrology for Climate Action: agreed outcomes and next steps from the WMO-BIPM Workshop", which was held on 26-30 September 2022. The presentation highlighted the importance of the relationship between the BIPM and the WMO.

Dr Rea gave an overview of the WMO, saying that it is a specialized agency of the United Nations concerned with weather, climate and water. It is headquartered in Geneva (Switzerland) and has 193 Member States. It is the second oldest UN agency, dating from 1950, however the heritage of the WMO dates back to the formation of the International Meteorological Organization in 1873. The WMO has around 300 staff who coordinate the work of thousands of national experts from meteorological and hydrological services from academia and the private sector. The WMO is Co-Founder and host agency of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Part II, Article 2 of the WMO Convention states that the purposes of the Organization "*shall be to facilitate world-wide cooperation in the establishment of networks of stations for the making of meteorological observations as well as hydrological and other geophysical observations related to meteorology.*" He said that the *raison d'être* of the organization is to make observations and to exchange and coordinate observations globally.

Dr Rea said that weather information received via sources such as mobile phones, the internet and television is underpinned by a massive coordinated global meteorological infrastructure that operates continuously to generate observations around the world and which exchanges the data internationally in real time. The observations come from a myriad of devices, for example *in situ* platforms, satellites, ships, buoys etc. The observations are exchanged and fed into global numerical weather prediction models, which run on super-computers in twelve global centres. The data is distributed to national meteorological and hydrological centres, which deliver services to end users. Successful application of weather and climate services depend on a functioning meteorological value chain and the coordinated global meteorological infrastructure requires agreed standards and the foundation of these standards is traceability. Measurement science and the standards that were set for the measurement of meteorological and hydrological variables are at the start of the value chain.

The WMO is organized into five departments, including the Infrastructure Department. In 2019 the WMO reorganized its technical commissions from eight to two: a Services Commission and an Infrastructure Commission (INFCOM). The Infrastructure Department includes the WMO Information System (WIS), which consists of the WMO Integrated Global Observing System (WIGOS) and the Global Data Processing and Forecasting System (GDPFS). The GDPFS produces the data products required by the members in order to deliver their services. WIGOS coordinates all of the observations taken by the WMO and its members. It incorporates the World Weather Watch, which is the global observing system for weather established in the 1950s and 1960s. It coordinates the observational components of the Global Atmosphere Watch (GAW) for atmospheric composition. WIGOS incorporates the WMO Hydrological Observations System (WHOS) and the Global Cryosphere Watch (GCW). In addition there are two contributing networks: the Global Climate Observing System (GCOS) and the Global Ocean Observing System (GOOS).

Dr Rea said that he had attended the COP27 (Conference of Parties) meeting held in Sharm El-Sheikh (Egypt) on 7-18 November 2022. He congratulated the BIPM on becoming an observer to the COP and commented that the WMO is also an observer. The WMO attends the COP to present meteorological science to the parties and to advocate for observing systems. The WMO presented the following initiatives at COP27: State of Climate; Early Warning Systems for all; Greenhouse Gas (GHG) Monitoring Infrastructure; and the GCOS Implementation Plan. He added that the Early Warning Systems for all initiative had been proposed by the WMO Secretary General and the UN Secretary General.

Returning to the State of the Climate he said that the climate is in a dangerous position with atmospheric GHGs at record levels. Annual increases in methane levels are the highest on record and although methane is short lived in the atmosphere, it is a powerful GHG. The exact reason for the increase in methane is not yet fully understood. The years 2015 to 2022 are set to be the eight warmest years on record, based on a number of different data sets. This highlights the urgent need for action on the climate. He stressed that the data sets used to calculate the annual global mean temperature are all based on observation data.

Dr Rea said that the UN Secretary General had used World Meteorological Day on 23 March 2022 to announce that the United Nations will spearhead new action to ensure that every person on Earth is protected by early warning systems within five years. The WMO was asked to lead this initiative and an action plan was presented at COP27, which received support from a large number of countries. He said that providing early warning systems for all will require comprehensive observing systems and a number of initiatives are being pursued. The WMO Infrastructure Department is leading an initiative called the Systematic Observation Financing Facility (SOFF). This initiative aims to fund basic observation systems in developing countries and to sustain these systems over time. This recognizes that, in the past, project funding has been put into infrastructure projects but has not always had the built in capability to sustain it. He added that cooperation with the BIPM is important to ensure that alongside any infrastructure that is installed, there is a need to build capabilities in the countries to ensure that their observations are traceable. This will require partnerships with NMIs. The Early Warning Systems for all initiatives will require new investment of US$ 3.1 billion within five years, with US$ 1.8 billion set aside for observations and forecasting. The SOFF will provide some of the money, with US$ 55 million already committed.

The Global Climate Observing System (GCOS) is a programme that has been operating for 30 years and the Essential Climate Variables (ECVs) are developed by GCOS. A new GCOS Implementation Plan is developed every 5-6 years, which updates the ECVs, determines where there are gaps and decides the actions required to address the gaps. The implementation plan is submitted to the UNFCCC and the GCOS sponsors and provides recommendations for a sustained and fit for purpose GCOS. It covers climate monitoring needs over the entire Earth system from the atmosphere to the oceans, from the cryosphere to the biosphere and encompasses the water, energy and carbon cycles. The 2022 GCOS Implementation Plan included 57 ECVs and the actions needed to address the gaps. Dr Rea said that the COP27 had included significant discussions on the GCOS Implementation Plan and it is anticipated that it will be recognized in the outcomes of the plenary session, which will send out a strong message to countries that they need to act to address the significant gaps in the observations for climate systems. He highlighted that one significant gap is ocean observations in the Antarctic, where the warming of oceans is a potential driver for the collapse of ice sheets. There is currently insufficient data to understand the risks.

Dr Rea said that the WMO had presented its proposals for a GHG Monitoring Infrastructure at COP27. Anthropogenic emissions of GHGs, primarily CO_2, CH_4 and N_2O, are the primary drivers of climate change. In response, the Paris Agreement was approved in 2015, aiming to hold the increase in global mean temperature well below 2.0° C (preferably 1.5° C), via reduction of GHG emissions. This is not a simple and straightforward proposition: what matters for climate is not how much carbon in the atmosphere is from anthropogenic; what matters is how much of it remains there at any given time. Successful mitigation requires monitoring and understanding of all GHG fluxes; natural as well as anthropogenic. There are significant uncertainties related to aspects of these fluxes and the way they are measured needs to be improved. The WMO proposal to improve the understanding of GHG cycles is to follow the same approach that has proven successful for weather prediction and climate monitoring. An integrated global GHG observing system is proposed as a component of the WIGOS, with timely international exchange of all GHG observations, both from satellite and surface platforms. Routine GHG modelling and assimilation will be carried out, converting observations into coherent, global estimates of greenhouse gas concentrations and fluxes. A framework will be developed for direct comparison and independent verification of model output with confidence in the outputs.

Dr Rea highlighted the collaboration between the WMO and the BIPM. The WMO signed the CIPM MRA on 1 April 2010 and has three Designated Institutes: Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), NOAA Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL) and

Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Center (PMOD/WRC). These DIs participate in five comparisons. Three conferences have been co-organized between the WMO and BIPM in 2010, 2015 and 2022 and the WMO participates in the Consultative Committee for Photometry and Radiometry (CCPR) and the Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM). WMO Expert Teams include a number of NMI experts, some of who chair the teams; stronger collaboration in this area would be welcomed.

Dr Rea returned to the Metrology for Climate Action workshop, which was hosted by the BIPM and WMO on 26-30 September 2022. The workshop had two themes: Theme 1 - Metrology in support of the physical science basis of climate change and climate observations; and Theme 2 - Metrology as an integral component of operational systems to estimate greenhouse gas emissions based on accurate measurements and analyses. The workshop had 1 078 registered participants and resulted in 145 draft recommendations, 99 for Theme 1 and 46 for Theme 2. These recommendations represent many opportunities for future collaboration between the WMO and BIPM. He highlighted some areas for future work and collaboration between the WMO, BIPM and NMIs based on the draft recommendations.

A standard vocabulary related to metrology is considered to be critical for increased collaboration and interoperability across domains in the field of climate action. This topic had already been identified at the 2010 BIPM-WMO workshop as being of importance, and has now been reiterated by most topic areas at the 2022 workshop. The WMO INFCOM-2 meeting in October 2022 agreed on the need to develop a WMO standard vocabulary, respecting other internationally recognized vocabularies such as the VIM. Development of a vocabulary will require strong collaboration between experts of the BIPM, NMIs and WMO. Collaboration with other groups such as the Open Geospatial Consortium will also be required. The WMO Commission for Observation, Infrastructure and Information Systems (INFCOM) has set up a team to develop training materials on metrological principles and contributions from more metrology experts would be welcome. In addition the WMO is developing guidance materials for traceability linked to the new ECVs and is updating the WMO guidance material to reflect new and innovative measurement methods.

There is a need to develop uncertainty methods relating to *in situ* and space-based measurements. Disagreement between satellite and *in situ* measurements are frequently not understood, even for well metrologically characterized measurements. Additional work is required to characterize the impact of siting on measurement uncertainty budgets. A significant, if not major, part of the uncertainty budget comes from the siting of an instrument rather than the measurement method. Further work and collaboration between the WMO and the metrology community is required on the traceability of water vapour measurements, for example radiosonde intercomparisons, and the traceability of ozone concentrations. Future work on the Greenhouse Gas Initiative will involve expansion of the network and a continuation of the collaboration between the WMO, BIPM and NMIs on the Global Atmosphere Watch Programme (GAW). In addition, the understanding of bias and uncertainties in GHG observations and data will be advanced.

Dr Rea said that there is already a strong partnership between the BIPM and the WMO and reiterated that measurement is the foundation of all of the WMO's activities. There is scope to build stronger collaboration at the international level with the BIPM and the WMO plans to work with its Members to build the connections at the national level. The Metrology for Climate Action workshop called for stronger engagement by NMI experts in the WMO Expert Teams, which are usually established with a four-year duration. The call for experts usually takes place before Expert Teams are established and the BIPM can nominate experts to take part in or contribute to the work of Expert Teams.

The President thanked Dr Rea for his presentation.

14. Report from the President of the CCQM

Dr Sang-Ryoul Park President of the Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (*Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie*, CCQM) presented his report on the activities of the CCQM since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCQM Executive summary

Dr Sang-Ryoul Park assumed the Presidency of the CCQM at its 25th plenary meeting (11-12 April 2019), succeeding Dr Willie E. May, who had served as CCQM President since the 19th meeting of the CCQM (18-19 April 2013). Due to travel restrictions imposed by the Covid-19 pandemic, meetings of the CCQM and its WGs were held on-line in 2020, 2021 and 2022. The BIPM Headquarters organized and hosted 194 on-line meetings for the CCQM and its working groups, including the 26th and 27th plenary meetings of the CCQM.

The revision of the CCQM strategy document was initiated in the October 2019, with the strategy document and individual WG plans for 2021-2030 presented to the CCQM at its 26th meeting, and the approved versions published on 21 June 2021.

The CCQM had reacted quickly to support SARS-CoV-2 measurement responses at NMIs. Activity had included a pilot comparison, CCQM-P216, on Quantification of SARS-CoV-2 monoclonal antibody in solution (coordinated by NIM, NRC and BIPM) and another, CCQM-P199b, on SARS-CoV-2 RNA copy number quantification (coordinated by LGC, NIM, NIBSC, and NIST). Throughout 2020 and 2021, the CCQM organized a series of webinars, hosted by the BIPM, to engage expert stakeholders on discussion of actions required to ensure reliable measurement in response to the Covid-19 pandemic. The CCQM on-line Workshop on 'A roadmap for metrology of infectious disease and future pandemic readiness', was hosted by the BIPM and held on 5 to 7 October 2021, and resulted in the publication of the 'CCQM roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response' on 5 September 2022. The implementations of the recommendations of the report will be overseen by a CCQM Task Group over the next 15 months, and include the development and implementation of 'fire drill' comparisons, to support rapid deployment of equivalent reference materials world-wide for any future event, and the development of e-learning modules.

The CCQM strategy identified stakeholder engagement as a key tool in promoting the activities and impact of the CCQM, and provided for a more structured approach to promote stakeholder engagement, including the use of workshops and webinars as well as Task Groups. The CCQM recommendation, in 2020, for a new value for the absorption cross-section of ozone, resulted in the formation of a Task Group for change implementation within the CCQM's Gas Analysis WG and it is actively working with all stakeholders to achieve an organized transition to the new reference value. In 2021, a Task group on Greenhouse Gas Scale Comparisons was established also in the CCQM's Gas Analysis WG to develop protocols and guidance on CO_2 in air standards to meet the needs of the greenhouse gas emissions monitoring community. Following the 2022 CCQM workshop on Microplastic Measurements and Standards, a Task Group was formed to develop proposals for a programme of activities in consultation with stakeholders that could be progressed within the CCQM.

The comparisons organized by the CCQM to support the 6 300 calibration and measurements capabilities in the chemistry/biology field continued throughout the period, with 50 new comparisons within the period and publication of 47 final reports of comparisons.

The CCQM has been organizing a series of on-line workshops with the goal of engaging stakeholders to understand and define measurement challenges within new emerging areas including: Microplastic Measurements and Standards; Particle Metrology; Metrology for Viral systems as metrology tools; Use of Mass Spectrometry in Radionuclide Metrology (with CCRI); The metrology of quantities which can be counted (with CCU).

Scope of the CCQM

The CCQM is responsible for developing, improving and documenting the equivalence of national standards (certified reference materials and reference methods) for chemical and biological measurements. It advises the CIPM on matters related to chemical and biological measurements including advice on the BIPM scientific programme activities.

The responsibilities of the CCQM are:

a. to establish global comparability of measurement results through promoting traceability to the SI, and where traceability to the SI is not yet feasible, to other internationally agreed references.
b. to contribute to the establishment of a globally recognized system of national measurement standards, methods, and facilities for chemical and biological measurements.
c. to contribute to the implementation and maintenance of the CIPM MRA with respect to chemical and biological measurements.
d. to review and advise the CIPM on the uncertainties of the BIPM's calibration and measurement services as published on the BIPM website.
e. to function as a forum for the exchange of information about the research and measurement service delivery programmes and other technical activities of the CC members and observers, thereby creating new opportunities for collaboration.

Strategy

The CCQM Strategy for the period 2021-2030 was published on 21 June 2021 and accompanied by descriptions of activities foreseen within the CCQM’s technical working groups for the period. The document sets out the strategy to be followed by the CCQM in the period 2021-2030 to deliver its mission of advancing the global comparability of chemical and biological measurement standards and capabilities, and thereby enabling Member States and Associates to make measurements with confidence. In so doing, measurement science will also be progressed, and stakeholder engagement strengthened. In developing its strategy, the CCQM expert groups have identified nine key sectors that are expected to influence and drive the development of National Metrology Institutes’ (NMI) and Designated Institutes’ (DI) services within the 2021-2030 period and impact CCQM activities for achieving global comparability of chemical and biological measurements. Scientific, economic, and social challenges, which can be tackled through metrology at the CCQM level, are described for the following sectors: Environment and Climate; Healthcare and Life Sciences; Food safety, trade and authenticity; Energy; Legal Metrology; Fundamental metrology and support of the SI; Forensic Sciences and Anti-doping; Advanced Manufacturing; Biotechnology and Drug Discovery.

The CCQM has set seven strategic aims to be progressed in the 2021-2030 period, notably: to contribute to the resolution of global challenges; to promote the uptake of metrologically traceable chemical and biological measurements; to progress the state of the art of chemical and biological measurement science; to improve efficiency and efficacy of the global system of comparisons for chemical and biological measurement standards it conducts; to continue the evolution of Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) to meet stakeholders needs; to support the development of capabilities at NMIs and DIs with emerging activities; to maintain organizational vitality, regularly

review and, if required, update the CCQM structure for it to be able to undertake its mission.

The strategy foresees contributions to progressing the state of the art in measurement science across all nine technical science areas covered by the Committee including Organic, Inorganic, Gas, Isotope Ratio, Surface, Electrochemical, Protein, Nucleic Acid and Cell analysis areas. Thirty-three activities have been identified where progress is expected, ranging from support for the development of new greenhouse gas, isotope ratio and microplastic standards, to the development of reference measurement systems for biomarkers, surface chemical composition, RNA quantification, food authentication, and cell counting as examples.

A more structured approach to stakeholder engagement is foreseen in the new strategy and considered to be a key tool in promoting the activities and impact of the CCQM and of the Chemical and Biological Metrology community in general. A mid- and long-term plan for stakeholder engagement will be developed, including possible extension of the CCQM Liaison Membership, to better represent the expanded technical coverage of the committee, extended collaborations with other Consultative Committees and sector specific fora established by the CIPM, and further use of task and focus groups to deliver the CCQM mission.

A core capability/comparison strategy will be continued with the aim of not increasing overall resources required for comparisons for the seventy-one institutes world-wide maintaining approximately 6 300 CMCs in the chemistry/biology field. Models for broad claim CMCs will continue to be developed, facilitating broader uptake of these, whilst meeting stakeholder needs, and potentially reducing the resources required to review and maintain CMC database entries.

Strong interaction will be maintained between the CCQM and RMOs, with continued coordination of linked, satellite and supplementary comparisons, and increased focus on capacity building and knowledge transfer including the initiation of mentoring programmes for NMIs coordinating comparisons for the first time.

The implementation of the strategy is supported by the BIPM Chemistry Department providing the CCQM Executive Secretary Role, coordination of comparisons in technical areas prioritized by the CCQM, laboratory-based knowledge transfer programmes for National Metrology Institutes with emerging metrology systems, the JCTLM database and support for engagement with stakeholder communities.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Change in CCQM Leadership, operations and meetings

Dr Sang-Ryoul Park assumed the Presidency of CCQM at its 25th plenary meeting (11-12 April 2019), succeeding Dr Willie E. May, who had served as CCQM President since the 19th meeting of the CCQM (18-19 April 2013). With the adoption of fixed terms for CCQM WG Chairs and deputy Chairs, new candidates were appointed to their positions during the 25th plenary meeting for the period 2019 to 2023.

The 25th plenary meeting was held at the BIPM Headquarters and was preceded by a CCQM Workshop on Advances in Metrology in Chemistry and Biology, coinciding with 25 years of CCQM activity, and was associated with a Focus Issue of *Metrologia* dedicated to 'Advances in Metrology in Chemistry and Biology'.

Due to travel restrictions imposed by the Covid-19 pandemic, meetings of the CCQM and its WGs were held on-line in 2020, 2021 and 2022, with the first onsite meeting of a working group held in October 2022. The BIPM Headquarters organized and hosted 194 on-line meetings for the CCQM and its working groups, including the 26th and 27th plenary meetings of the CCQM.

Publication of the CCQM 2021-2030 Strategy

The revision of the CCQM strategy document was initiated at the October 2019 meeting of the CCQM Strategic Planning Working Group. New vision and mission statements were developed and approved

by the CCQM as well as seven strategic aims for the committee to achieve in the 2021-2030 period. All nine technical working groups initiated strategic reviews in 2020 of their activities and future plans for the forthcoming period. The strategy document and individual WG plans were presented to the CCQM at its 26th meeting, and after an additional period for comment, the approved documents were published on 21 June 2021.

CCQM response to the Covid-19 Pandemic

The importance of ensuring reliable diagnostic measurements as part of the response to the Covid-19 Pandemic led to the development of reference materials and methods at NMIs and DIs in 2020, both for SARS-CoV-2 viral RNA and SARS-CoV-2 monoclonal antibody quantification. In 2020 the CCQM also initiated two comparison studies to demonstrate the global consistency of such materials and methods, through its Nucleic Acid Analysis and Protein Analysis Working Groups. The comparison study on SARS-CoV-2 viral RNA quantification (CCQM-P199.b), coordinated by the LGC, NIM, NIST and the NIBSC, was completed in a very short period of six months from the initiation of the study. The comparison demonstrated the very good comparability that could be achieved with reverse transcription digital-PCR (dPCR) and a potential reference method, with a very much smaller spread of results than for conventional laboratory-based methods and equivalence of results to non-PCR methods, demonstrating the potential accuracy of dPCR. The comparison on the quantification of SARS-CoV-2 monoclonal antibodies (CCQM-P216), coordinated by the NIM, NRC and BIPM, was completed and published in November 2021, providing the first CCQM comparison study on this size of protein structure and the level of comparability that could be achieved using quantification methods based on peptide fragment quantification following tryptic digest.

Throughout 2020 and 2021, the CCQM organized a series of webinars, hosted by the BIPM, to engage expert stakeholders in discussion of actions required to ensure reliable measurement in response to the Covid-19 pandemic. The webinars covered the issues of: performance of laboratories in proficiency testing schemes; performance and standards needs for molecular, antigen and mass spectrometric methods; performance and standardization of high throughput testing methods. The 26th meeting of the CCQM plenary meeting included a session of how NMI/DI activities would evolve to contribute to a robust infrastructure to enable readily available reliable measurements for infectious diseases in potential future pandemics. The CCQM on-line Workshop on ‘A roadmap for metrology of infectious disease and future pandemic readiness’, was hosted by the BIPM and held on 5 to 7 October 2021, with the goal to develop a roadmap for metrology to support measurements associated with infectious disease and future pandemic readiness, based on identifying and characterizing appropriate prognostic and diagnostic technologies, platforms and data management/integration, and recommending specific metrology interventions that could enable a more rapid response and enhance clinical outcome for a future pandemic. The workshop resulted in the publication of the ‘*CCQM roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response*’ on 5 September 2022. The implementations of the recommendations of the report will be overseen by a CCQM Task Group over the next 15 months, and include the development and implementation of ‘fire drill’ comparisons, to support rapid deployment of equivalent reference materials world-wide in case of any future event, and the development of e-learning modules for those laboratories developing capabilities in this field.

Stakeholder Engagement

The CCQM strategy identified stakeholder engagement as a key tool in promoting the activities and impact of the CCQM, and provided for a more structured approach to promote stakeholder engagement. To carry this forward, the strategy proposed the establishment of a new CCQM Task Group to develop mid- and long-term plans for stakeholder engagement, including:

- Extension of CCQM Liaison membership to represent the expanded technical coverage
- Interaction with other Consultative committees
- Strong participation in sector-specific fora established by the CIPM
- Further use of Task Groups to deliver the CCQM mission.

The Task Group was established during the 26th CCQM meeting, and produced eight recommendations including the use of workshops and webinars as well as Task Groups within the CCQM to engage stakeholders.

The creation of Task Groups at the CCQM and CCQM working group level to achieve well defined goals with stakeholder communities has progressed substantially in the period. In 2020, the CCQM recommended a new value for the absorption cross-section of ozone, which would underpin world-wide ozone monitoring, following a CCQM workshop on the topic. A Task Group for the implementation of the new Ozone Cross-section was established within the CCQM's Gas Analysis Working Group and is actively working with all stakeholders to achieve an organized transition to the new reference value. In 2021, a Task group on Greenhouse Gas Scale Comparisons was established also in the CCQM's Gas Analysis Working Group to develop protocols and guidance on CO_2 in air standards to meet the needs of the greenhouse gas emissions monitoring community. Following the 2022 CCQM workshop on Microplastic Measurements and Standards, the CCQM approved the formation of Task Group to develop proposals for a programme of activities in consultation with stakeholders that could be progressed within the CCQM.

Metrology for Climate and the Environment

At its 27th meeting, the CCQM initiated the practice of including a sectoral focus session in its meetings, starting with Environment and Climate Sector. Six of the CCQM technical Working Groups had identified in the CCQM 2021-2030 strategy document that their activities supported this sector and presented summaries of these. Relevant activities were submitted to the BIPM-WMO Workshop on Metrology for Climate Action held in September 2022, as well as contributions that would be relevant to the newly established CIPM Sector Task Group on Environment and Climate.

Support for CIPM-MRA activities

The comparisons organized by the CCQM to support the 6 300 calibration and measurements capabilities in the chemistry/biology field continued throughout the period. Despite disruptions to comparisons schedules due to the Covid-19 Pandemic and changes in the geopolitical situation, the majority of planned comparisons could be initiated and completed. The CCQM initiated 50 new comparisons within the period and also published 47 final reports of comparisons.

In its 26th meeting, the CCQM approved the formation of a CCQM Task Group to update guidance on KCRV estimation. The task group was charged with updating the document CCQM/13-22, developed in 2013, for the 'estimation of a consensus KCRV and associated Degrees of Equivalence', taking into account new developments and approaches including dealing with the concept of 'dark uncertainty'. The task group is expected to produce an updated draft at the end of 2022.

Metrology for Health

The CCQM contributed to the 2021 theme for world metrology on 'Measurements for Health', by contributing to the JCTLM-led initiative to launch a series of on-line videos explaining the role of standardization and metrology and the importance of metrological traceability to the field.

Addressing New Measurement Challenges

The CCQM has been organizing a series of on-line workshops with the goal of engaging stakeholders to understand and define measurement challenges within new emerging areas and then develop proposals for activities that can be progressed with the CCQM to address these. The CCQM workshops planned so far were: Microplastic Measurements and Standards (5-6 April 2022); Particle Metrology (25-27 October 2022); Metrology for Viral systems as metrology tools (24-27 January 2023). In addition, joint workshops with other Consultative Committees have also been planned, notably: CCRI-CCQM Workshop on the Use of Mass Spectrometry in Radionuclide Metrology: Opportunities and Challenges (14 to 16 February 2023); CCU/CCQM Workshop on "The metrology of quantities which can be counted" (28 to 30 March 2023).

Support from Programmes at the BIPM Headquarters

The Chemical Metrology Department and Programmes at the BIPM Headquarters have continued to support CCQM activities as foreseen in the 2017-2026 CCQM Strategy, with the planned support activities updated in the 2021-2030 CCQM strategy document. In addition to supporting the CCQM comparison programme through coordination of comparisons for the Gas, Isotope Ratio, Organic and Protein Working Groups, the Department has supported the development of capabilities at NMIs and DIs with emerging activities through the provision of knowledge transfer programmes, which were converted to on-line e-learning modules to adapt to the restrictions imposed by the pandemic. The transition to exclusively on-line meetings for a period of almost 3 years, was facilitated by the support of the Department that organized and hosted the 194 on-line CCQM meetings in the period. The eight on-line CCQM workshops in the period have also been hosted by the BIPM, and the Department is supporting the three newly established CCQM Task Groups both at technical and organizational level.

CCQM Data

CCQM set up in 1993

President:	S.-R. Park
Executive Secretary:	R.I. Wielgosz
Membership:	24 members, six liaisons and 13 observers
List of CCQM members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccqm/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	11-12 April 2019, 26-28 April 2021, 27-29 April 2022
Full reports of the CCQM meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccqm/publications
Eleven Working Groups:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccqm

- Cell Analysis (CCQM-CAWG)
- Electrochemical Analysis (CCQM-EAWG)
- Gas Analysis (CCQM-GAWG)
- Inorganic Analysis (CCQM-IAWG)
- Isotope Ratios (CCQM-IRWG)
- Key Comparisons and CMC Quality (CCQM-KCWG)
- Nucleic Acid Analysis (CCQM-NAWG)
- Organic Analysis (CCQM-OAWG)
- Protein Analysis (CCQM-PAWG)
- Strategic Planning (CCQM-SPWG)
- Surface Analysis (CCQM-SAWG)

One *ad hoc* Working Group:

- *ad hoc* Working Group on the Mole (CCQM-AH-WG-MOLE)

CCQM Comparison activity	Completed/ In progress	Planned
CCQM key comparisons	172	12 per year
BIPM ongoing comparisons	1	6
CC pilot studies	134	4 to 5 per year
CMCs	6 288 CMCs in 67 service categories registered in the KCDB	

15. Metrology for accurate satellite-based observations of climate variables

Dr Donlon, Head of Earth Surfaces & Interior Section, Earth & Mission Sciences Division, European Space Research and Technology Centre (ESTEC), European Space Agency (ESA), gave an invited presentation on "Metrology for accurate satellite-based observations of climate variables". He said that his presentation would give the view of one space agency on how it can deal with the question of accuracy of measurements for climate measurements; other space agencies are engaged in the same tasks.

There are many world-wide urgent priorities regarding climate change and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). Having evidence to help with setting priorities and making decisions regarding climate change and the SDGs is critical. Earth Observation provides unequivocal evidence and facts that underpin many of the examples found in climate reports. Earth Observation provides a significant evidence base due to the vast volume of data generated from the observations. *In situ* observations are equally important, but the volume of data is far less than from Earth Observation.

The ESA currently has 82 satellite missions in various stages, including 15 operational flights. Each satellite mission carries a sensitive scientific instrument, which produces measurements. The currency of each Earth observation is a scientific measurement, and it is the duty of the ESA to ensure that each measurement is calibrated and referenced back to the SI units and that there is full traceability. This is particularly important when the volume of data being generated is considered. The Copernicus mission is the European Union's Earth observation programme. Copernicus is served by a set of dedicated satellites (the Sentinel families) and contributing missions (existing commercial and public satellites). The Sentinel satellites are specifically designed to meet the needs of the Copernicus services and their users. Copernicus observes all global landmass every 5 days at 10 m resolution. A total of 25 TB of data is produced daily by the Sentinel satellites and 250 TB of Sentinel products are disseminated every week for services to society.

Dr Donlon gave a series of examples of evolving needs in metrology for environment and climate at the European Space Agency, noting that climate change has very different requirements than weather observations. For example, 10 times greater accuracy is required, such as 0.03 K rather than 0.3 K; there may be considerably more key variables; and prediction time scales may be in decades rather than days. In addition, observations must maintain consistency over many decades, which is longer than the lifetime of many space-based instruments and may involve the use of multiple satellites. The Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) and the Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS) held a joint workshop entitled "SI-Traceable Space-based Climate Observing System" at the NPL (UK) on 9-11 September 2019. The workshop produced a report on what was required to improve the traceability of observations.

Dr Donlon said that space-based observations of the ECVs can be considered as "taking the pulse of the planet". The ECVs are key indicators that describe the Earth's changing climate. Scientists use

these variables to study climate drivers, interactions and feedback, as well as reservoirs, tipping points and fluxes of energy, water and carbon. The climate-quality datasets produced by the Climate Change Initiative are a major contribution to the evidence used to understand climate change. Satellite products provide a valuable complement to *in situ* measurements. These observations are valuable for regional applications since they provide multi-channel images at very high spatiotemporal resolutions. There are issues concerned with how to navigate data, how to strengthen the interoperability of data and stewardship of data; the digital transformation is an important element in addressing these needs.

There is a need for confidence in the metrological quality of the data and this is the critical role played by the SI in addressing global climate challenges. Trustworthy observations from space are needed to: monitor and assess progress resulting from mitigation; improve the understanding of climate sensitivities, dependencies and forecasts; and support adaptation, food security emergency response and de-risk investments. To make trustworthy decisions based on observations will require data that is quantitative, comprehensive, accessible and usable. In addition, it will require an integrated, interoperable global observing system (space and *in situ*); robust references (benchmarks) against which to reliably measure change in as short a timescale as possible; and international acceptance. Decisions such as when and how big to build the next Thames barrier in the UK or improving defences against sea level rise in the Netherlands will be based on the evidence from observations.

The ESA's Climate-Space programme uses data from multiple satellite missions to produce ECV and climate data records. The output is used as the evidence base to support Member States in responding to the requirements of the UNFCCC Paris Agreement. The output also improves modelling and provides a baseline for verification of data and allows the ESA to give an assessment of the state of the climate to the WMO and IPCC. Dr Donlon stressed that the ESA recognizes the essential role of the SI in providing confidence in the accuracy and global comparability of measurements needed for protection of the environment, global climate studies and scientific research.

Dr Donlon said that the Quality Assurance for Earth Observation (QA4EO) best practice framework provides a series of steps to a fundamental data records (FDRs)/thematic data products (TDPs) or fiducial reference measurements (FRMs) uncertainty budget for space-based Earth observation. The five steps are to: define the measurand and measurement function; establish the traceability with a diagram; evaluate each source of uncertainty and fill out an effects table; calculate the product and its uncertainty; and store relevant information for future users. FRMs are a suite of independent, fully characterized, and traceable ground measurements that follow the guidelines outlined by the Group on Earth Observations (GEO)/CEOS QA4EO. The FRMs are the measurements that are essential to ensure that space observations work well. He presented the traceability of fiducial reference instruments by using the example of the traceability of a field radiometer through to the ITS-90. He added that comparisons are regularly carried out on instruments and it is essential to maintain the traceability and reference measurements on the ground to those in space. Satellites that monitor rising sea levels use radar to measure the height of the ocean. These instruments are effectively altimeters and they rely on accurate nanosecond timing to guarantee the accuracy of the measurements. Any future developments concerning UTC will be monitored so that they can be implemented and applied seamlessly to the instruments.

The ESA is working to ensure that SI traceability is incorporated into all new satellite designs and the actual build of the satellites. The ESA has adopted the concept of total standard uncertainty and it is working with satellite manufacturers to implement pre-launch characterization of calibration in an appropriate way. Pre-launch calibration has been included in the equation for the uncertainty of satellites to ensure that industry owns the responsibility for the calibration in space; there will be no more absolute radiometric accuracy. In summary, the ESA is mandating the SI as an integral part of the construction of satellites along with the need for uncertainties and that these are delivered to users. He said that the ESA is following the BIPM GUM approach to uncertainties.

Dr Donlon gave details of the Sentinel-6 mission, which is dedicated to monitoring sea level rise. Sentinel-6 will maintain the satellite reference altimeter time series and is a joint mission between the ESA, EUMETSAT, *Centre national d'études spatiales* (CNES), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the European Union. Rising sea levels are an important variable and represent a societal threat; the low-lying coastal zone is home to 680 million people world-wide and 3 million extra people are at risk of flooding for every 1 cm of sea level rise. The record of sea level rise over time is made up of observations from multiple satellites and in order to ensure a seamless transition between satellites it is necessary to fly them very close together for 12 months. He said that it could be argued that this is a wasted opportunity; it would be better to make measurements with the satellites dispersed to obtain a better geographical sample and spread. However, it is essential that the sea level record includes a good handover from one satellite to another and this is being carried out with many satellites today. For example, Sentinel-6 and Jason-3 carried out a tandem flight, 220 km apart, over 12 months to ensure the continuation of the 30-year Global Mean Sea Level record.

Dr Donlon presented details of the TRUTHS mission which is being prepared as part of the ESA EarthWatch mission. TRUTHS (Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial- and Helio- Studies) is a standards laboratory in space and represents a 'gold standard' to support the climate emergency. TRUTHS is an operational climate mission that will enable climate benchmarking to enhance the ability to estimate the Earth's radiation budget whilst at the same time ensuring that a 'gold standard' is created that can be used to cross-calibrate different missions in the visible spectrum and shortwave infrared. It will also provide SI traceability of measurements in space for the first time. A benchmark measurement is one with characteristics (documentation, SI-Traceable uncertainty, representative sampling) that allows it to be unequivocally considered a 'reference' of the specified measurand against which future measurements of the same measurand, can be compared.

Dr Donlon summarized his talk by saying that climate data records from satellites are fundamental to the work of the ESA and that it is committed to delivering the Climate-Space programme. Metrology is essential due to the overwhelming volume of data from space: small errors have major impacts on climate time series. He noted that almost all the climate records from high latitude regions have been derived from space observations: the changes being witnessed in the Arctic come from space observations and the quality of the data is very good. The ESA is embedding metrology (uncertainty and traceability) into all of its satellite engineering and scientific processes: in satellite design and data processing; via Fiducial Reference Measurements (FRMs) for validation; for flying constellations using tandem flights; in new SI Traceable Satellite (SITSat) missions dedicated to SI traceability (for example TRUTHS); and by implementing QA4EO uncertainty modelling techniques. He reiterated that the ESA recognizes the essential role of the SI in providing confidence in the accuracy and global comparability of measurements needed for protection of the environment, global climate studies and scientific research.

The President thanked Dr Donlon and invited questions.

Dr Wielgosz asked Dr Donlon to comment on the ESA programme for monitoring GHGs from space. Dr Donlon replied that the ESA is planning the Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring (CO2M) mission as part of the flagship Copernicus series, which will be launched in the next few years. The mission will make local measurements of CO_2 emissions using a number of satellites flown in constellation. The measurements will be provided within 24 hours of the observations and will form the core of the CO_2 monitoring system. He added that the CO_2 measurements should not be seen out of context; to have CO_2 measurements on their own is important but it is vital to know how the information can be used. For example where is the CO_2 going, how does it get into the ocean and how much is going into the ocean, where is the sink in the ocean, and is there a temperature dependency and fugacity

in the surface layer. Space-based measurements of sea surface temperature, ocean waves, roughness and winds therefore form a complementary set of observations that together can help to drive and formulate the right way forward for understanding these issues, while at the same time providing fundamental measurements for global climate modelling.

16. Report from the President of the CCPR

Dr Maria Luisa Rastello, President of the Consultative Committee for Photometry and Radiometry (*Comité consultatif de photométrie et radiométrie,* CCPR) presented her report on the activities of the CCPR since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCPR Executive summary

Established as the Consultative Committee for Photometry in 1933, and further extended to include Radiometry in 1971, the CCPR now covers metrological aspects of optical radiation, which range from well-known measurements to very advanced research fields. Between 1997 and 2005, the CCPR established three Working Groups (WGs) to deal with specifics topics as outlined in their names: Strategic Planning (CCPR-WG-SP), Key Comparisons (CCPR-WG-KC), and Calibration and Measurement Capabilities (CCPR-WG-CMC). In each of the three WGs, there are several Task Groups (TGs) and Discussion Forums (DFs) that are not permanent but address specific metrological needs or pressing issues.

Since the 26th CGPM meeting (2018), CCPR members have contributed to:

- The finalization of key documents related to the Candela definition and its *m*ise en pratique.
- The definition of a longer-term strategic objective to implement a scientifically rigorous photometric system based on cone-fundamentals to provide a new link between photometric and radiometric quantities.
- The adoption of a risk-based approach for reviewing requirements and provides further guidance regarding the scope of Key Comparisons in terms of CMC support (“how far the light shines”). Flowcharts and checklists are included to ensure all requirements are clear and aid reviewers.

Scope of the CCPR

The responsibilities of the CCPR are to:

- provide advice to the CIPM on all matters concerned with photometry and radiometry.
- establish global compatibility of related photometric and radiometric measurements through promoting traceability to the SI photometric unit, the candela, and associated derived units for photometric and radiometric quantities.
- contribute to the establishment of a globally recognized system of national measurement standards for photometry and radiometry and development of absolute radiometry methods and facilities.
- contribute to the implementation and maintenance of the CIPM MRA in the field of photometry and radiometry.
- review and advise the CIPM on the uncertainties of the photometry and radiometry calibration and measurement capabilities as published on the BIPM website.
- act as a forum for the exchange of information about the photometry and radiometry activities of the CCPR members and observers.
- create opportunities for collaboration in the field of photometry and radiometry.

Strategy

The strategy developed by CCPR members to cover the responsibilities listed above are detailed in the Strategy document, which was recently updated to cover the period 2022 to 2032. A brief summary is provided below.

The CCPR strategic goals for the 2022-2032 period are to:

- contribute to the resolution of global challenges in photometry and radiometry.
- promote the uptake of metrologically-traceable photometric and optical radiometric measurements.
- progress the state of the art of photometry and optical radiometry measurement science.
- improve efficiency and efficacy of the global system of comparisons for photometry and optical radiometry.
- continue evolving the set of Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) to meet stakeholders needs.
- maintain organizational vitality, regularly review and, if necessary, update the CCPR structure so it can perform its mission.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Membership

Two new members joined the CCPR in 2022: Justervesenet (JV, Norway) and INMETRO (Brazil), and one new observer: National Scientific Centre “Institute of Metrology” (NSC-IM, Ukraine). All three institutes delegated experts to present their activities at the 25th CCPR meeting, and their membership was recommended to the CIPM who adopted the proposal during its June 2022 meeting.

Meetings and workshops

Since November 2018, the CCPR has held two plenary sessions, in September 2019 (BIPM Headquarters) and May 2022 (on-line). The September 2019 session included selected talks on advances in PR metrology. This was not repeated during the on-line 2022 session in view of the limited timing.

No specific CCPR workshops were organized due to the Covid-19 pandemic. However, the conference NEWRAD was held on-line and the BIPM-WMO “Metrology for Climate Action” workshop was held in September 2022, with CCPR member involvement.

Advising the CIPM and promoting traceability to the candela

The candela and related documents

At the 26th meeting of the CGPM, CCPR members presented the results of major revisions of key documents related to the Candela definition and its *mise en pratique*. This document was finalized after the 26th CGPM, for official publication in May 2019, together with the SI Brochure Appendix 3: Units for photochemical and photobiological quantities. It was complemented with the publication of the Principles governing photometry, revised in a joint effort with the International Commission on Illumination (CIE) to include standard spectral luminous efficiency functions for mesopic vision (twilight), and to ensure consistency with the new SI adopted in 2018. These publications were produced within three Task Groups of the Strategy Working Group, which were officially closed during the 25th meeting of the CCPR (May 2022).

Cone-fundamentals system

The CCPR has continued to reflect on the candela since the revision of the SI in 2019. Dr Rastello gave a summary in the presentation entitled "Key Scientific questions in the definition of the SI unit of luminous intensity, the candela", given at the 25th meeting of the CCU (2021). There is an agreement within the CCPR that the present definition serves all practical requirements for global trade, science, and society. However, there is a key scientific challenge related to the defining constant K_{cd} linking photometric and radiometric quantities, which has no fundamental character. Potential changes may arise from recent and future progress made in vision science and artificial intelligence, bringing a much better understanding of the luminous perception using the 'cone-fundamentals' system. CCPR members gave themselves a longer-term strategic objective to implement a scientifically rigorous photometric system based on cone-fundamentals to provide a new link between photometric and radiometric quantities. This could have a significant impact on measurement devices, manufacturers, regulations and standardization that are based on the present definition of the candela (2018) with the defining constant K_{cd}. A new Task Group was created at the 25th CCPR meeting to start discussions on this topic.

Digitalization

At the 25th meeting of the CCPR, WG-SP proposed a new TG on "discussion on the impact on digitalization on matters related to the CCPR". Dr Blattner will chair the task group. The proposed Terms of Reference are to monitor activities related to digitalization in the field of photometry and radiometry and to support and coordinate the implementation of the SI digital framework in the field of photometry and radiometry.

Ensuring global compatibility of measurements

In accordance with its policy, international comparisons on key quantities currently undertaken at the CCPR level are repeats of the set of ten "cycle 1" comparisons. The ten "cycle 2" comparisons are at various stages of progress, with CCPR-K3.2014 published in 2022 and measurements completed for four other comparisons. During the last CCPR meeting in May 2022, delays in conducting comparisons were reported by several members, first due to laboratories being closed during the Covid-19 pandemic, and then due to restrictions in communication and cooperation between some countries linked with the situation in Ukraine.

Meanwhile, RMOs published the reports of five comparisons to demonstrate the compatibility of more laboratories around the world, and measurements started for five others. This includes the first comparison conducted within GULFMET, GULFMET.PR-K4.2012 by UME (Türkiye), with NIS (Egypt) and SASO-MNCC (Saudi Arabia) as participants.

In addition, supplementary comparisons were carried out within the RMOs to underpin measurements related to the use of optical fibres, notably within COOMET. A comparison was also conducted by PMOD in its role of World Radiation Center for WMO on total solar irradiance. The instrument used, the Cryogenic Solar Absolute Radiometer (CSAR) has been developed by NPL (UK), PMOD/WRC and METAS (Switzerland).

Improvements in the CIPM MRA

The efforts started after the 25th CGPM meeting (2014) to improve the processes of the CIPM MRA continued over the four years to 2022, with a focus on guidelines to rationalize the CMC claims and their evaluation. This task was conducted within a Task Group (WG-CMC-TG3) of the CMC Working Group, which produced new guidelines, CCPR-G9 "Rules for review of CMC claims and requirements for supporting evidence". The new guidelines were approved and published in June 2021.

The guidelines adopt a risk-based approach for reviewing requirements and provide further guidance regarding the scope of Key Comparisons in terms of CMC support ("how far the light shines"). Flowcharts and checklists are included to ensure all requirements are clear and aid reviewers. Consequently, the associated document "Supporting evidence for CMCs in PR" was updated to comply with the new rules.

Challenges and difficulties

CCPR members reported in late 2021 that the Covid-19 lockdowns experienced in 2020 and 2021 severely impacted research and delayed calibration services. International collaborations have also been severely impacted by the pandemic due to travel restrictions, and since February 2022 by additional communication restrictions linked with the geopolitical situation. This situation has impacts on conducting Key Comparisons, which are being dealt with case by case by participants.

Outlook in the short and long term

In the short term, CCPR members will focus on completing the second round of the existing portfolio of key comparisons, which are still considered to be adequate to underpin the needs of the CCPR community. Meanwhile, a number of Pilot Studies have started that will help to understand the need for future comparisons and to verify the practicability of the comparisons. Five such activities have already started to:

- investigate the extension of the wavelength range of the existing KC CCPR-K6.
- investigate LED-based standard lamps for existing KCs.
- investigate a comparison of spectral responsivity in the THz spectral range.
- investigate a comparison on detection efficiency of single-photon detectors.
- investigate a comparison on optical fibre power responsivity using a fibre-coupled cryogenic radiometer.

After the recent progress made in guidelines to review CMCs, the system will be maintained but no major revision should be required in the next five years. A discussion around the mathematical treatment of Key Comparison results to reach equivalence (additional variance) and its impact on CMCs, started in 2021 within the Key Comparisons and CMC working groups, will continue and will be treated within relevant Task Groups meetings and workshops. Likewise, methods to link RMO and CCPR comparisons started to be scrutinized two years ago, and more guidelines are expected in the coming years.

A comprehensive survey was conducted by Task Group 10 of the CCPR-WG-SP to gather the needs and expectations of CCPR members on all topics covered by the CC in photometry and radiometry. While the outcomes of this survey are still under analysis, trends clearly show the need to organize several workshops, create new task groups and launch pilot studies in domains of high interest to members, such as LED-based standards, UV metrology, few photon metrology, photovoltaic standards, optical properties of materials, and climate and environmental observations.

A workshop on the cone-fundamentals system and the impact on future PR measurements is already planned for the next CCPR meeting in 2024. It reflects the high interest of CCPR members in this domain in which the CIE is also involved. Related activities are still considered as research, but developments will be monitored to prepare the measurement systems for potentially important changes. Likewise, the new Task Group on digitalization will be a forum to discuss how digitalization will impact the work of the CC, considering possibilities to produce machine-readable documents under the responsibility of the CC or to interrogate the KCDB with devoted APIs and automate associated work of CC member institutes.

CCPR Data

CCPR set up in 1933

President:	M.L. Rastello
Executive secretary:	J. Viallon
Membership:	25 members, 2 liaisons and 4 observers
List of CCPR members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccpr/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	19-20 September 2019, 10-11 May 2022
Full reports of the CCPR meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccpr/publications
Three Working Groups:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccpr

- Key Comparisons (CCPR-WG-KC)
- CMC (CCPR-WG-CMC)
- Strategic Planning (CCPR-WG-SP)

CCPR Comparison activity	Completed	In progress	Planned [period]
CCPR key comparisons (and supplementary comparisons)	12 KC, plus 3 SC, 3 before MRA, 1 repeat, 4 bilateral	4 KC	4 KC [2022-2026]
BIPM comparisons	3	0	0
CC pilot studies	3	2	3
CMCs	1 345 CMCs in 85 service categories registered in the KCDB		

The President thanked Dr Rastello for the presentation.

17. Report from the President of the CCT

Dr Yuning Duan, President of the Consultative Committee for Thermometry (*Comité consultatif de thermométrie*, CCT) reported on the activities of the CCT since the 26th meeting of the CGPM (2018). Preparation of this report received the strong support of Prof. Graham Machin, National Physical Laboratory Senior Fellow (UK) and chair of the CCT Working Group for Non-Contact Thermometry (CCT-WG-NCTh).

Executive summary

The CCT covers metrology linked to temperature, humidity and thermophysical quantities[3].

A precise and accurate knowledge of temperature and related quantities is important in many domains of science, technology and industry. For example:

- Temperature is a key control parameter in industry; its reliable measurement is inextricably linked to efficient energy use and product quality.
- Temperature and humidity metrology play important roles in climate studies.

[3] Thermophysical quantities describe thermal behaviour in matter, such as thermal conduction or thermal insulation.

– Reliable thermophysical quantity measurements are essential to quantify, for example, the performance of thermal insulations.

Since the 26th meeting of the CGPM (2018), the CCT has given attention to realizing and disseminating the redefined kelvin, focused on improving climate-based measurements and contributed to improving clinical thermometry during the Covid-19 pandemic. The CCT strategy underwent a major refresh in 2021 and is now fully aligned with the "CIPM strategy 2030+: responding to evolving needs in metrology". There are significant emerging challenges for the CCT, for example how to conduct key comparisons for thermodynamic temperature and implement digitalization, especially through validating approaches that provide *in situ* traceability to the kelvin (for example practical primary thermometry).

Scope of the CCT

The CCT gives advice to the CIPM on all scientific matters and issues that influence metrology in the fields of temperature, humidity and thermophysical quantities. It acts as the focus and network for this diverse community, to develop common aims and facilitate collaboration between national metrology institutes (NMIs) and designated institutes (DIs) in Member States or with other relevant bodies. The CCT assures the global measurement infrastructure for thermometry through promoting and supporting the international temperature scale of 1990 and providing extensive best practice in thermometry and related quantities. It also identifies and organizes key comparisons in its fields to establish global comparability of measurements and traceability to the SI, assuring the quality of reported data. It also encourages research in NMIs in progressing the kelvin realization and dissemination and supports the measurement infrastructure needed to respond to global challenges, such as climate change and pandemics.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

The CCT and the redefinition of the kelvin

Until May 2019 the kelvin was defined by the temperature of the triple point of water – the temperature where ice, water and water vapour coexist. Incremental improvements to its realization have been made; for example by deriving corrections for the influence of the isotopic composition of the water. However in May 2019, the kelvin, along with the ampere, kilogram and mole were redefined in terms of defined values of fundamental constants.

The redefinition of the kelvin by the Boltzmann constant was a key objective of the CCT, which played a key coordinating role in achieving a successful outcome for the kelvin redefinition. A large number of metrology institutes, using different techniques and realizations, determined the Boltzmann constant k with low uncertainty. Four main approaches were investigated; the speed of sound in Ar or He gas (Acoustic Gas Thermometry, AGT); a capacitance approach through the dielectric constant of He (Dielectric Constant Gas Thermometry, DCGT), Johnson (electrical) noise in a resistor (Johnson Noise Thermometry, JNT) and Doppler broadening of a spectral line (Doppler Broadening Thermometry, DBT).

International collaboration between involved institutes was indispensable to get a clear picture of the results, especially an understanding of the systematic uncertainty components. The set acceptance criteria for the Boltzmann constant (CCT Recommendation T1 (2014) on the new definition of the kelvin)

– a relative standard uncertainty of the adjusted value of k less than 1×10^{-6},
– a determination of k based on at least two fundamentally different methods, of which at least one result for each have a relative standard uncertainty less than 3×10^{-6},

were exceeded in that AGT, DCGT and JNT had sufficiently low uncertainties to contribute to the consensus value of the Boltzmann constant. The set criteria ensured there was no discernible difference

in temperature between the old and new definitions. The CODATA special adjustment in 2017 provides the exact value

$$\boldsymbol{k = 1.380\ 649\ 10^{-23}\ \text{J/K}}$$

The preparation for the new definition of the kelvin was accompanied by a *mise en pratique*[4]. The *mise en pratique* is a document that guides the user from the kelvin definition based on *k* to a practical (laboratory) realization of the unit. It contains the following: the definition of the kelvin, definition of terms related to primary thermometry, criteria for inclusion of a thermodynamic method, an outline of primary thermometry methods for realizing the kelvin based on fundamental laws of physics [Acoustic gas thermometry, Radiometry, Dielectric Constant Gas Thermometry, Refractive Index Gas Thermometry, Johnson Noise Thermometry] and the text of the defined temperature scales, ITS-90, PLTS-2000. This document is not only a guide but represents the current state of the art in thermometry and condenses decades of experience.

The present temperature scales ITS-90 and PLTS-2000 are not affected by the redefinition. A comprehensive electronic guide "Guide to the realization of the ITS-90"[5] was updated and is available on the BIPM website. Guides for secondary thermometry (specialist fixed points and thermocouples) have also been produced.

Recent publications of relevance include a *Metrologia* focus issue on the Boltzmann constant[6] in 2015, a special edition of *Phil. Trans. A* by the UK Royal Society on implementing the new kelvin[7] in 2016 and an invited summary paper on the redefined kelvin[8] in 2018.

The different primary instruments developed for the determination of the Boltzmann constant are now being used to measure thermodynamic temperature over a wide range of temperatures to determine the difference between thermodynamic temperature to the present temperature scale ITS-90. This phase is expected to last until the mid- to late-2020s. This will result in a revised evaluation of T-T_{90}, which is necessary for the community of users where precise values of thermodynamic temperature are required. It is not envisaged that a new temperature scale will be needed in this decade. The temperature community is instead focused on putting into practice two recent CCT recommendations:

- T1 (2017) where Member States' National Metrology Institutes (NMIs) are encouraged to "take full advantage of the opportunities for the realization and dissemination of thermodynamic temperature afforded by the kelvin redefinition and the *mise en pratique* for the definition of the kelvin (*MeP*-K)".
- T1 (2021) that NMIs establish capability to determine T-T_{90} above 400 K, and in so doing establish the background capacity for dissemination of thermodynamic temperatures approaching 700 K.

It is clear that at high temperatures >1300 K and low temperatures <25 K dissemination of thermodynamic temperature is feasible. The ongoing research in NMIs will show how wide a temperature range dissemination of thermodynamic temperature is possible in the longer term.

[4] Mise en pratique - kelvin - Appendix 2 - SI Brochure (bipm.org)
[5] https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guide-its90.html
[6] http://iopscience.iop.org/journal/0026-1394/page/Focus_on_the_Boltzmann_Constant
[7] Machin, G., "Towards implementing the new kelvin", 2016, *Phil. Trans R. Soc. A.* **374**: 20150053, http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0053
[8] Machin, G., "The Kelvin redefined", 2018, *Meas. Sci. Technol.* **29** 022001 https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9ddb

Strategy

In 2012, the CCT carried out a significant analysis of its accomplishments since the introduction of the CIPM MRA and a forecast of its impact. This analysis in the form of a Strategic Plan was updated and published in 2017[9] and provided a global picture of the present and future needs in thermal metrology. The CCT strategic plan underwent a complete revision in 2021 and now covers the period 2021 to 2030[10]. In a break with the way in which the previous CCT Strategic Plan was formulated this one identified stakeholders' interests at the top level of metrology aligning its priorities with the document "CIPM strategy 2030+: responding to evolving needs in metrology". The activities of the CCT are profoundly cross-cutting and as its strategy was developed it was clear that the CCT could contribute to all seven key priority areas identified in the CIPM document namely: climate change and environment, health and life sciences, food safety, energy, advanced manufacturing, digital transformation and "new" metrology. The full CCT Strategy and summary can be found on the BIPM website[11].

CCT working and task groups

There are seven Working Groups within the CCT: Contact Thermometry (WG-CTh); Environment (WG-Env); Non-Contact Thermometry (WG-NCTh); Humidity (WG-Hu); Key Comparisons (WG-KC); CMCs (WG-CMC); and Strategic Planning (WG-SP). The CCT is also supported by a number of Task Groups, which will have a limited duration depending on achievement of the objective and/or time.

WGs and TGs of particular note are:

- WG CTh and WG NCTh, in conjunction with WG SP, worked closely together to ensure the kelvin redefinition was effective.
- WG on Environment focuses on engagement with the meteorological community and climate measurements.
- TG on Body Temperature Measurement was established to improve fever screening on a global basis in response to the Covid-19 pandemic and has published guides for non-contact body temperature measurement[12] in English and Spanish.
- TG on emerging technologies – with emphasis on detailing and promoting novel photonic approaches to thermometry such as ring-resonators, Doppler Broadening Thermometry and self-calibration: a recent paper[13] described some of its findings.
- TG on Digitalization – focused on ensuring the CCT responds appropriately and is ready for the needs of digitalization.

Comparisons

Several comparisons within the CCT are approaching completion since the last CGPM. Notably, on the realization of the ITS-90 using Standard Platinum Resistance Thermometers (CCT-K9) and realizations of the ITS-90 above the silver point (CCT-K10); are nearing conclusion. A repeat of the realization of the triple point of water began in 2021 and is well under way. A comparison of realization of local scales of dew-point temperatures of humid gas is under way and should be completed before the mid-2020s. The CCT has presently identified seven key comparisons, listed in the table below.

[9] https://www.bipm.org/utils/en/pdf/CCT-strategy-document.pdf
[10] https://www.bipm.org/documents/20126/41598583/CCT+Strategy/145827b2-4f6a-42ed-bd77-bbffa782e2f7
[11] https://www.bipm.org/documents/20126/41598622/CCT+Strategy+Summary/f3f211d0-a520-17ae-089f-c70719e39771
[12] Best Practice Guide in forehead thermometry
[13] Dedyulin S., Ahmed Z., Machin G., "Emerging technologies in the field of thermometry", 2022, *Meas. Sci. & Technol.* **33** 092001 https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac75b1

Set of CCT Key Comparisons		Repeats	
CCT-K1	Realization of the ITS-90 from 0.65 K to 24.6 K		
CCT-K2	Realization of the ITS-90 from 13.8 K to 273.16 K		
CCT-K3	Realization of the ITS-90 from 83.8 K to 933.4 K	**CCT-K9**	Realization of the ITS-90 from 83.8 K to 692.7 K
CCT-K4	Comparison of local realizations of Al and Ag freezing-point temperature		
CCT-K5	Realization of the ITS-90 from 961 °C to 1700 °C	**CCT-K10**	Realization of the ITS-90 from 961 °C to 3000 °C
CCT-K6	Humidity: Dew and frost point temperatures (–50 ° to 20 °)	**CCT-K8**	Humidity: Dew point temperatures (30 ° to 95 °)
CCT-K7	Water triple point cells	**CCT-K11**	Repeat foreseen in 2019

Interaction with international bodies

The CCT, via the Working Group for Environment, has several members on the Commission for Instruments and Methods of Observation (CIMO) Expert Teams of the World Meteorology Organization (WMO), and reciprocal input in the CCT working group. This arrangement has been in place since 2015.

Active exchanges take place between the CCT and the International Association on Properties of Water and Steam (IAPWS) on issues related to humidity.

The TEMPMEKO conference, in conjunction with Tempbeijing held in Chengdu (China) in 2019 was the most recent opportunity for the international thermometry community to exchange information. The forthcoming International Temperature Symposium in California (USA) in April 2023 will be the first global gathering of temperature experts since the Covid-19 pandemic.

CCT Data

CCT was set up in 1937	
President:	Y. Duan
Executive Secretary:	S. Solve
Membership	25 members and three observers
List of CCT members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	20 October, 4 November, 17 November 2020, 19 January, 9 February 2021, 18 January and 8 February 2022
Full reports of the CCT meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/publications

Seven Working Groups: https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct

- Calibration and Measurement Capabilities (WG-CMC)
- Contact Thermometry (WG-CTh)
- Environment (WG-Env)
- Humidity (WG-Hu)
- Key Comparisons (WG-KC)
- Non-Contact Thermometry (WG-NCTh)
- Strategic Planning (WG-SP)

Seven Task Groups:

- Digitalization (TG-DIG)
- Thermophysical Quantities (TG-ThQ)
- Emerging Technologies (TG-CTh-ET)
- Calibration media (TG-CTh-CalMed)
- Calibration and reference thermocouples (TG-CTh-TC2)
- Air Temperature (TG-Env-AirT)
- Industrial Radiation Thermometers (CCT-TG-NCTh-IRT)

CCT Comparison activity	Completed	In progress	Planned [2023-2026]
CCT key comparisons (and supplementary comparisons)	10	16 +(18)	0
BIPM comparisons	0	0	0
CCT pilot studies	3	0	3
CMCs	2 940 thermometry CMCs registered in the KCDB (14 September 2022)		

The President thanked Dr Duan and closed the second session.

Third session – 16 November 2022 (morning)

The President of the CGPM welcomed the delegates to the third session.

18. The work of the JCTLM to overcome challenges to the global standardization of clinical laboratory testing

Prof. Miller, Chair of the Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM) and Professor of Pathology, Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia (USA), said that his invited presentation would cover the measurement of biomolecules in body fluids by medical laboratories to inform medical decisions; the importance of equivalent testing results for health care; the role of metrological traceability in enabling equivalent results; the JCTLM's support to the *in vitro* diagnostics (IVD) industry; the challenges of achieving globally standardized medical laboratory results; and the people in all countries who benefit from the work of the JCTLM.

He said that the JCTLM had been established in 2002 in response to the regulatory requirements of the EU In Vitro Diagnostic Medical Devices Directive (IVDD), now the European Union In Vitro Diagnostics Regulation (IVDR), that are relevant globally. The JCTLM is sponsored by the BIPM, the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC), the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), and the International Council for Standardization in Haematology (ICSH). The BIPM provides the JCTLM Secretariat.

Prof. Miller gave an overview of what constitutes laboratory medicine. When a person interacts with the healthcare system via a doctor in a clinic or hospital, the physician will examine the patient and may order laboratory tests to check the patient's condition. As part of the diagnostic process the patient may have a blood test or another sample taken. The sample is sent to a medical laboratory, where the testing is carried out. Medical laboratories around the world perform 3 000 to 4 000 different tests. When the results are available, the physician will consult with the patient to make a diagnosis, decide on a therapy or determine the risk for future health issues.

The *in vitro* diagnostics industry consists of enterprises that develop medical laboratory measuring systems, which are also known as IVD devices. The IVD industry has a value of around US$ 125 billion globally and IVD products are marketed around the world. The industry supports research into new biomarkers for diseases and collaborates with medical laboratory professionals to provide laboratory medicine for patient care. The IVD industry and medical laboratories collaborate to provide laboratory medicine results.

Prof. Miller said that laboratory test results should be the same everywhere and this is a principle that underpins the work of the JCTLM. Laboratory test results are compared to decision values to make a diagnosis or define a therapy. Three examples were given: a glucose level of >7 mmol/L is a diagnostic for diabetes, one of the most important medical conditions globally; a level of the cardiac marker troponin of >99 %-tile is a diagnostic marker for a heart attack, requiring rapid intervention; and the estimated glomerular filtration rate (eGFR) of creatinine as a biomarker ($eGFR_{creatinine}$ <60 mL/min/1.73m^2) is a diagnostic for chronic kidney disease. There are many other examples and laboratory tests are an integral part of making a diagnosis and therapeutic decisions for patient care.

Prof. Miller said that medical errors can be caused by 'between method variability'. He cited the example

of a study carried out in 2012[14] where different procedures for measuring parathyroid hormone (PTH) were compared among 18 individuals. PTH maintains calcium homeostasis in the body and calcium is critically important for regulating heartbeat and muscle contractions. The study compared two methods of measuring PTH with a range of IVD devices in patients with chronic kidney disease to determine the patients that reached the diagnostic value at which a drug is administered to help control their calcium metabolism. The two methods gave different results, with none of the patients tested using Method A qualifying for the drug, whereas for those tested using Method B, half qualified. He said that this is a challenge faced by the laboratory medicine sector; there are many IVD tests on the market that have not been standardized in a way that allows them to achieve equivalent results. In the case of PTH, a reference system is being developed collaboratively between the IFCC (developing a reference method), the National Institute for Biological Standards and Control (NIBSC) (developing a commutable certified reference material) and the CCQM (carrying out a primary reference material comparison among reference laboratories to ensure that all reference laboratories can achieve equivalent results).

Metrological traceability is the tool that enables equivalent results to be achieved. NMIs in many countries are responsible for developing reference materials and reference measurement procedures. The IVD manufacturers use the higher-order references to assign values to their working calibrators and eventually to what is known as an 'end-user calibrator'. The IVD medical devices, which are produced by the same manufacturers, are sold in medical laboratories and used to make measurements of clinical samples. When the system is fully developed it is possible to claim that the clinical sample result is traceable to those higher-order references. The document ISO 17511:2020 describes metrological traceability and the requirements for achieving it and is followed by the IVD industry. This higher-order reference system allows IVD devices made by any manufacturer to have traceability, and so they can produce equivalent results for patient status, which is true anywhere in the world because this higher-order reference system is stable and reproduceable in different locations. In addition, when new IVD measurement procedures come on the market, they can link into this metrological traceability system and have values equivalent to others already on the market. Over time the same higher-order reference system can be maintained because one of the requirements is to be stable, and so it is possible to maintain this calibration system over time and achieve equivalent results.

Prof. Miller said that ISO has additional international standards addressing the requirements for reference measurement procedures (ISO 15193:2009), certified reference materials (ISO 15194:2009), and calibration laboratories (ISO 15195:2018) that use those reference measurement procedures. The JCTLM supports laboratory medicine and the *in vitro* diagnostic industry by maintaining a database of higher-order reference materials, methods and services, all of which have been evaluated by review teams to check their conformance to the ISO standards. All higher-order reference systems listed in the JCTLM database have been reviewed and approved to meet the ISO standards. This process is supported by the BIPM in particular, but also by a large number of volunteers who make up the review teams in all disciplines of laboratory medicine.

The JCTLM launched a new version of its database in October 2022, which is machine readable and has an application programming interface (API) for published reference materials, methods and services. The API will allow the IVD industry and other users to connect directly to the database and receive updates automatically when new information is posted. It also supports development of user specific applications and allows JCTLM data to be added to digital products. The new version includes a web-based application to search the database.

[14] Almond A, Ellis A.R., Walker S.W.. Current parathyroid hormone immunoassays do not adequately meet the needs of patients with chronic kidney disease. *Ann. Clin. Biochem*. 2012, **49**(1), 63-67. https://doi:10.1258/acb.2011.011094

Prof. Miller reiterated that laboratory medicine requires equivalent results to use clinical decision values based on health outcomes research. *In vitro* diagnostics manufacturers use JCTLM listed references with confidence to achieve metrological traceability, to achieve equivalent results for clinical samples, and to meet regulatory requirements to market their products.

He recalled the "Workshop on overcoming challenges to global standardization of clinical laboratory testing: reference materials and regulations" held in December 2021 that was organized jointly by the JCTLM, IFCC and International Consortium for Harmonization of Clinical Laboratory Results (ICHCLR). The virtual workshop attracted 400 participants from 65 countries. The workshop resulted in the publication of a report "Overcoming challenges regarding reference materials and regulations that influence global standardization of medical laboratory and testing results."[15]

The workshop generated a series of recommendations. Recommendation 1 was to develop higher order reference system components as early as possible in the life cycle of IVD measurement procedures used by medical laboratories. This would prevent the situation whereby different manufacturers have different calibration schemes that are not consistent or coherent with each other, forcing the need to develop a reference system after products enter the market. It is preferable for the reference system to be developed as part of introducing new biomarkers to the marketplace to encourage standardized results from the beginning that would correlate with whatever clinical trials were associated with the decision values that are going to be used with those new biomarkers. Recommendation 2 is to coordinate global prioritization of measurands needing standardized measurement results. It is very important that resources are used as efficiently as possible and coordinating what needs to be prioritized is important to avoid duplication of effort and to ensure the most important analytes are addressed. Recommendation 3 is to coordinate the global supply of certified reference materials. The IVD industry needs a reliable primary and a secondary supply of reference materials, but there is no requirement for multiple sources, which would represent duplication of effort. Changing reference material supplier introduces considerable revalidation and recertification costs for industry, and therefore industry seeks reliable and continuous sources for its reference materials. This is a challenge because countries are independent of each other and NMIs may feel responsible to ensure that the needs of a specific country are met. These three recommendations could be considered by the CIPM as part of its future engagement with the healthcare sector.

The workshop also recommended that the JCTLM should identify reference materials that are useful but do not meet all ISO requirements. The JCTLM has a role to ensure that everything in its database meets the ISO requirements; this is important to ensure acceptance by the IVD industry and to gain acceptance by regulatory bodies around the world. The final recommendation is that regulatory review should be internationally harmonized. Developing globally recognized requirements for regulatory review will improve availability of standardized results. Regulatory review is critical for the safety of patients, and every country wants to make sure that all *in vitro* diagnostic testing is going to produce high-quality results suitable for taking care of patients. However, because the regulations are national, the IVD industry has to frequently make separate submissions with slightly different formats. The different data requirements for every country they market in results in a huge expense overall for the healthcare sector. Developing globally recognized requirements for regulatory review will improve the availability of standardized results by lowering the cost, which means the same amount of money can be used to standardize or develop additional metrological traceability schemes.

Prof. Miller completed his presentation by saying that the work of JCTLM improves healthcare for everyone everywhere in the world.

---

[15] Miller, W., Myers, G., Cobbaert, C., Young, I., Theodorsson, E., Wielgosz, R., Westwood, S., Maniguet, S. and Gillery, P. Overcoming challenges regarding reference materials and regulations that influence global standardization of medical laboratory testing results. 2023, *Clin. Chem. Lab. Med.*, **61**(1), 48-54. https://doi.org/10.1515/cclm-2022-0943

The President thanked Prof. Miller and invited questions. It was asked if there is a recommendation about developing reference materials for new diagnostic devices as they are being developed. Prof. Miller replied that the goal is that when an IVD manufacturer is the first to market a new biomarker, they take responsibility to ensure that reference systems are developed as part of that initial development process. This is a challenge because within the IVD industry there is competition to be first to market in order to maximize profits for being the sole provider of a new laboratory testing procedure. Eventually, if it is a good test, other manufacturers will come onto the market, and the goal is to provide the resources early enough in the life cycle of a new biomarker so that new manufacturers can take advantage of those resources and the situation, as presented for parathyroid hormone, can be avoided. There is no simple solution to the problem, but it is well recognized, by both the laboratory community and the IVD industry, that this is a desirable goal.

19. Accurate diagnostics as part of metrology readiness for potential future pandemic events

Dr Maria Zambon, Head of Influenza, Respiratory, Virology and Polio Reference Services at the UK Health Security Agency, gave a pre-recorded presentation on "Accurate diagnostics as part of metrology readiness for potential future pandemic events". Dr Zambon said that she has worked in the field of developing diagnostics for new and emerging viruses for the last 20 years.

She said that everyone will have had some experience of the response to the SARS coronavirus and the presentation will cover some of the experiences of developing diagnostics for SARS, however in the period 2020 to 2022 it has been necessary to respond to other unknown and known viruses, which required the development of new diagnostic tests. In 2022 there have been outbreaks of hepatitis of unknown aetiology, which has required the development of diagnostics and in the UK there has been a resurgence in polio for the first time in 40 years. The polio outbreak was discovered through environmental surveillance, which required the development of new or improved diagnostics for community-based surveillance. In addition, the monkeypox epidemic continues globally. All of these have required some aspect of immediate and urgent public health response, including the development of new diagnostics.

When a new virus emerges there are huge challenges for the application of diagnostics. Not every emerging virus leads to a pandemic, but the problems of diagnostic preparedness and response capability remain the same in the early stages, which are measured in hours, days and weeks, rather than months and years. A timescale was presented for the emergence of SARS-CoV-2 in the UK. In the early stages there was an emergency response followed by a need to expand capacity for diagnostic testing capability as the number of cases started to increase. Finally, as the virus became established in the community, there was a necessity to identify and deal with viral diversity as new variants of the virus emerged. Each phase of the response had associated challenges ranging from the requirement for new reagents and quantitative standards during the 'emergency new virus detected' phase through to the ability to respond to new variants in the final phase of a pandemic. The 'interpandemic' or 'business as usual' phases should involve investigations into improving preparedness, which might include the development of new methodologies and rehearsing capabilities.

Dr Zambon presented the response to the SARS-CoV-2 to illustrate a few points about the response to a pandemic. A consortium of international laboratories, which developed the first test for coronavirus through the World Health Organization (WHO), published a paper on the subject.[16] The first reports of

[16] Corman V.M. *et al*, Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR. *Euro Surveill.*, 2020, **25**(3), 2000045. https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000045

cases of severe pneumonia in China were made on 30 December 2019. The WHO convened an Expert Group, including the Centers for Disease Control and Prevention (CDC) Atlanta (USA), on 8 January 2020. Between 8 and 23 January 2020 a massive amount of laboratory work was undertaken to develop nucleic acid amplification tests (NAAT) for the novel virus, leading to the publication of the report, which set out the methodology, on 23 January. The WHO declared a public health emergency of international concern on 30 January 2020. The Expert Group included two spin-off companies or small-scale industrial partners, which were able to develop some of the key initial reagents that were required for the preliminary development work, including *in vitro* transcripts. This highlights that although scientific expertise and laboratory capabilities are needed during the early phases of a pandemic, some form of industry partnership is necessary to produce reagents that are required quickly and at scale.

In order to develop nucleic acid amplification tests, knowledge of the genome that is to be detected is required, which is the diagnostic modality used for detecting viruses based on PCR reactions. A schematic of the SARS-CoV-2 genome was presented. To produce the reagents, enzymes and chemicals needed to conduct nucleic acid amplification tests, knowledge of viral replication of the actual virus is required to determine what kind of template materials can be used as the target for setting up new diagnostic tests. The template materials can be purified virus particles, virus-infected cells, virus-like particles that are generated through a combination of molecular engineering, recombinants, transcribed RNA, or other synthetic templates, which can act as surrogate templates and panels of clinical material. The correct template materials are required in the initial biochemical reaction to establish detection tests based on nucleic acid amplification. There are many ways to achieve this but when a new virus is encountered without a virus particle or capability to grow the virus, because the correct starting point is unknown, it is necessary to use alternative materials, which are derived from either having very similar viruses available or being able to create them via synthetic systems or through engineering so-called “reverse genetics viruses”.

The second part of developing nucleic acid tests which are fit for purpose is having panels of clinical material that either contain the correct virus, which is very difficult at the point of an emerging virus infection, or which come from a similar clinical syndrome or have similar viruses. This is linked to sensitivity and specificity: following the development of a NAAT based on the best available biochemistry in a laboratory, it is necessary to test the NAAT on clinical material, which may seriously affect the specificity of the biochemistry. NAATs cannot distinguish between infectious and non-infectious virus, which is an important point overall in the application of newly-emerging viruses but is less important at the immediate detection stage.

Dr Zambon said that the process of diagnostic test development and performance assessment involves a number of different elements. These are the availability of materials, the necessity for an assurance process, and supporting documentation. There is an opportunity to consider how individuals and institutions who have expertise in the area of standards and metrology can contribute to the urgent situations that arise when there is the emergence of a new human virus, in the areas particularly of assurance, documentation and development of software.

One of the first considerations during the development of a new test, particularly the biochemical phase of test development, is to determine the limit of detection (LoD) of the proposed assay. An example was given of the determination of limits of detection based on SARS coronavirus genomic RNA and 2019 novel coronavirus-specific *in vitro* transcribed RNA. The LoD work is important in the handling of false positives and false negatives, both of which cause problems within health systems at different stages of an epidemic. During the first phase of a pandemic, when emergency first detections of new infections are being made, false negatives are a problem to avoid missing infections. During the later phases, false positives become a problem.

Dr Zambon said that the kinetics of viral replication are complicated. Research at Imperial College (UK) since 2020 investigated the relationship of detection by nucleic acid amplification to detection by infectious virus for SARS-CoV-2. It was found that the amount of infectious virus shed is much less than the detection of viral RNA and this relationship is important from the perspective of infection control. This is relevant because different tests have different sensitivities. Lateral flow tests are based on detection of viral protein and do not involve a signal amplification step. Other tests, such as Loop Amp, involve isothermal amplification with a different type of kinetic to PCR. Lateral flow tests, Loop Amp and PCR all have the ability to detect virus but with different sensitivities.

Dr Zambon commented that the regulatory situation for polio has implications for the development of diagnostic assays. The WHO recently introduced the Global Action Plan for Poliovirus Containment, 4th edition (GAP IV), which is a biorisk management regulation to support the global eradication of polio. GAP IV calls for no propagative activity, the destruction or transfer of all polio infectious material, no storage of polio containing materials, and no use of native nucleic acid. Countries that operate under the GAP IV biorisk management regulation will need to develop surrogate templates for use in improving diagnostics. Countries that operate under different biorisk management regulations, for example ACDP, have the ability to continue to work with virus materials. However, most countries that are pursuing a polio eradication programme will be working under GAP IV.

Dr Zambon concluded by saying that some of the ideas mentioned in the presentation have been discussed with the CCQM in an effort to develop a “Roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response”. The aim of the discussions around the roadmap are to address some of the gaps that have been identified and the quality assurance needs that have been demonstrated. There are definite needs in order to improve future planning for pandemics, including methodologies and production. In addition, there are analytical requirements such as software development and documentation to support rapid scale-up.

The President thanked Dr Zambon for the pre-recorded presentation. Dr Julian Braybrook, Chair of the CCQM Task Group that developed the “Roadmap to metrology readiness for infectious disease pandemic response” was invited to outline the key points from the roadmap and the actions that are foreseen in the next 15 months.

Dr Braybrook thanked everyone involved in the development of the roadmap and stressed that it is a joint effort. He said that a number of recommendations came out of the development of the roadmap, which could be grouped under the headings of QA needs, gaps and future planning. A Task Group has been set up to address a number of the items that were identified and it will operate until December 2023. One of the key outputs was having rapidly deployable metrology solutions. A number of “fire drill exercises” will be run to demonstrate the capability of the metrology community to respond to future pandemics as fast as possible. The metrology community responded to SARS-CoV-2 in four months from the moment it was able to do so, however, this was nine months after the start of the pandemic. Dr Zambon highlighted that solutions are being sought to allow the response within the first month; the hope is that the exercises will demonstrate capability and allow solutions to be found for areas that need improvements. The Task Group will examine standardization approaches that can be used when drafting the minimally-acceptable product specifications that can be used by the *in vitro* diagnostics industry. A final issue is how to transfer, deploy and maintain the capability that has already been developed and how to develop it further across the whole metrology community, including the RMOs. It is anticipated that this will be carried out via guidance and training materials that will be made available by mid-2023 through the BIPM website.

The President thanked Dr Braybrook and invited questions.

Dr Milton asked Dr Braybrook, Dr Park (President of the CCQM) and Dr Wielgosz (Executive Secretary of the CCQM) to reflect on the process used for developing the roadmap. He added that it represents a new way for the CIPM Consultative Committees to consult rapidly with NMIs to bring together consensus, views, open a discussion and pull together the different issues and views. He asked if this is a mechanism that other CCs could adopt in fields where they have challenges with new stakeholder requirements. Dr Braybrook replied that this is a possibility; the process did pull together representatives from countries that had a major role at the start of the response to the SARS-CoV-2 epidemic, although it did not involve all the parties. This is linked to improving ease of deployment. He added that the CCQM is using Task Groups more often, which allows work to be carried out in advance of a requirement, rather than acting retrospectively.

20. Report on liaison activities from the IAEA

Ms Zakithi Msimang, Medical Radiation Physicist – SSDL Officer, Dosimetry and Medical Radiation Physics Section, International Atomic Energy Agency (IAEA), gave an invited presentation on the collaboration between the BIPM and the IAEA.

The IAEA has a mandate to seek to accelerate and enlarge the contribution of atomic energy to peace, health and prosperity throughout the world. The IAEA works with its 173 Member States and multiple partners world-wide to promote safe, secure and peaceful use of nuclear technologies. The three pillars of the IAEA's work are: safeguards and verification; safety and security; and science and technology. The IAEA delivers its mandate through six departments and the presentation focused on the work of the Department of Nuclear Sciences and Applications. This department includes the Marine Environmental Laboratory, the Human Health Division and the Physical and Chemical Sciences Division. The Marine Environmental Laboratory interacts with the CCQM through representation in its Working Groups, participation in comparisons and via the development of some reference materials that are used by the Member States. The Physical and Chemical Sciences Division is concerned with neutron measurements and has participated in the CCRI activities. The Department of Nuclear Sciences and Applications operates twelve laboratories based in Seibersdorf (Austria), Vienna and Monaco.

The IAEA Division for Human Health has a role to strengthen the capabilities of Member States to address the needs related to the prevention, diagnosis and treatment of health problems through the application of nuclear techniques. The division has four sections that cover: Radiotherapy and Applied Radiobiology; Dosimetry and Medical Radiation Physics; Nuclear Medicine and Diagnostic Imaging; and Nutrition and Health Related Environmental Studies. The Dosimetry and Medical Radiation Physics section includes a group for Medical Physics, a Dosimetry laboratory, the secretariat for the IAEA/WHO Secondary Standards Dosimetry Laboratories (SSDLs) network, and an Education and Training group. The Education and Training group is concerned with training Member States in the application of nuclear technology related to nuclear medicine, diagnostic radiology and radiation therapy.

The Medical Physics group develops and harmonizes guidance on physical and technical aspects of quality assurance to support safe and effective use of radiation in medicine. The Dosimetry laboratory provides calibration and audit services to the Member States. Calibration services are only provided to Member States that are part of the SSDL Network and to some hospitals where there is no laboratory in the country. The IAEA/WHO SSDL Network has 88 SSDLs in 75 Member States. There are also 16 Primary Standards Dosimetry Laboratories (PSDLs) that are affiliated members and five collaborating organizations, including the BIPM. The objectives of the SSDL Network are to ensure accurate measurements that are traceable and consistent, to promote cooperation among users and harmonization

of standards that are used to perform measurements. The IAEA achieves most of its traceability via the BIPM and calibrations that it performs are only for ionization chambers. Since 2010 the IAEA has calibrated 693 ionization chambers in 77 Member States. A total of 7 172 calibration coefficients have been provided, which have been used by the SSDLs to further calibrate equipment in hospitals.

Ms Msimang recalled that the IAEA signed the CIPM MRA in 1999 and in 2003 the IAEA was involved in the audit of the BIPM Ionizing Radiation laboratories. The BIPM and the IAEA signed a Memorandum of Understanding in June 2012, which allows the BIPM Ionizing Radiation Department to use an irradiator on the IAEA premises. The IAEA participates in all of the CCRI Working Groups and some of the CCQM Working Groups. Dr David Burns, BIPM Ionizing Radiation Department, is a member of the Scientific Committee of the IAEA/WHO SSDL Network that reviews and gives input to the strategy of the Dosimetry and Medical Radiation Physics (DMRP) Section.

The IAEA provides training to its Member States in various activities and offers guidance documents that are used while performing actual measurements in hospitals. The International Symposium on Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry, which was held in 2002, 2010 and 2019, is the only event that brings together scientists from the laboratories (PSDLs and SSDLs) and clinical medical physicists. The Symposium focuses on standards, applications and quality assurance in medical radiation dosimetry. Experts from the BIPM Ionizing Radiation Department have been actively participating in the symposia, with their focus being on both technical aspects and the CIPM MRA. This is particularly important because some of the SSDLs in the network do not have knowledge of metrology. In addition, some of the SSDLs do not have an understanding of the quality infrastructure because they are established in the regulatory framework. The engagement of the BIPM has allowed more and more SSDLs to gain an understanding of the CIPM MRA and the quality infrastructure and as a result these SSDLs have become designated by their NMI. The IAEA output of publications includes Dosimetry Codes of Practice, Guidelines for Radiation Measurements, and Guidelines for Quality Assurance and Quality Control. BIPM Ionizing Radiation Department staff have made significant contributions to the drafting and reviewing of many of the documents, particularly in the area of diagnostic radiology.

Ms Msimang said that although there has been much collaboration between the IAEA Dosimetry and Medical Radiation Physics laboratories and the BIPM for many years, there is scope for collaboration in other areas that may be of benefit to the Member States. The Food and Agriculture Organization (FAO)/IAEA Centre of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, which undertakes research into food safety and control, and the Division of Physical and Chemical Sciences, which deals with nuclear data, are areas where increased collaboration could be considered.

The President thanked Ms Msimang and invited questions.

Dr Milton thanked Ms Msimang and asked if collaboration in the FAO/IAEA Centre of Nuclear Techniques in Food and Agriculture would be a role for the CCRI. Ms Msimang replied that it is more likely to be a topic for the CCQM. Dr Louw, the CIPM President, added that this is an interesting answer as it reflects the earlier proposals for the establishment of cross-cutting forums. He asked if there should be a cross-cutting forum between the CCRI and the CCQM and if so, would the IAEA be interested in participating. Ms Msimang replied that there are some projects that could be inter-linked, for example environmental monitoring and the testing of food for the absence or presence of radionuclides.

21. Report from the President of the CCRI

Dr Martyn Sené, President of the Consultative Committee for Ionizing Radiation (*Comité consultatif des rayonnements ionisants*, CCRI) presented his report on the activities of the CCRI since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCRI Executive summary

In the period 2019 to 2022, the CCRI has continued to focus on enabling all users of ionizing radiation to make measurements with confidence at an accuracy that is fit for purpose so that the many benefits of ionizing radiation (IR) can be realized and the risks minimized. At a CCRI level, and in the 3 "Sections" that focus on metrology for different aspects of ionizing radiation, the CCRI has continued to work across the metrology community and with a wide range of end-users and other stakeholders to ensure that the CCRI understands their needs and collaborates with them to achieve its mission.

In the last 4 years the CCRI has welcomed five new members, one observer and two liaison organizations. There are now a total of 48 institutes and organizations currently involved at the CCRI plenary or Section level.

At the heart of this has been an enormous amount of work maintaining the integrity, validity and utility of ionizing radiation CMCs (calibration and measurement capabilities) and improving some of the fundamental data that underpin them. The BIPM contribution to this is particularly noteworthy; of the 110 comparisons in the period of this report, 80 % have been bilateral BIPM comparisons.

Particular developments in the last four years include:

- A new WG bringing together metrologists and stakeholders from the medical community to address measurement issues in the rapidly developing fields of radionuclide therapy and quantitative nuclear imaging.
- A new Task Group, collaborating with the Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM), to guide the introduction of new technologies for the measurement of low electrical current for ionization chambers used in the measurement of radionuclide standards and used widely in medical and radiation protection applications.
- Working with Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM) to understand how developments in metrology using mass spectrometry can be applied to its increasing potential use in measuring low-level (for example environmental) and long-lived (for example nuclear waste and forensics) radionuclides.

The constraints on working due to the Covid-19 pandemic during this period catalysed the development of new virtual mechanisms for communication and involvement of the community. These included a series of webinars that have brought together stakeholders and metrologists from across the globe with a total of 1 277 individuals from 89 states and economies participating across 17 webinars. The CCRI has now convened a CCRI Communication Working Group (CCRI-COMWG) to ensure it can continue to use these and other (in person and virtual) mechanisms to support the CCRI and its mission.

Looking ahead, the CCRI will continue to respond to challenges but will also need to respond to the digital revolution including the integration of the SI Digital Framework into ionizing radiation metrology. New requirements from technological developments are anticipated, such as innovative nuclear reactor designs and the transition of fusion power from R&D to commercial application.

The success and impact of the CCRI is the result of the work of a large number of individuals from across the global IR community whose commitment and contribution should be highlighted.

Scope of the CCRI

Ionizing radiation continues to be used around the world for many beneficial applications in healthcare, research, material production and characterization, and in support of a secure (low-carbon) energy supply. However, ionizing radiation is also known to cause material and physical damage, including the risk of carcinogenesis. The Vision and Mission of the CCRI and the Mission of the BIPM Ionizing Radiation Department recognize and reflect its valuable role in this context:

> ***CCRI Vision***
>
> A world in which the many benefits of ionizing radiation for healthcare, industry and technology can be realized by accurate and scientifically-rigorous measurement, confident that the associated risks are minimized.
>
> ***CCRI Mission***
>
> The CCRI mission is to discuss, foster, enable and coordinate the development, comparison and promulgation of national measurement standards for ionizing radiation. The aim is to enable all users of ionizing radiation to make measurements with confidence and at an accuracy that is fit-for-purpose.
>
> ***BIPM IR Department Mission***
>
> to support the CCRI in its mission, to promote the work of the international metrology community, and to provide services to NMIs and DIs that can be centralized in an efficient way.

As of November 2022 there are 13 members, four liaison organizations and ten observers of the CCRI. In the four years since the 26th CGPM the CCRI has welcomed five new members, one observer and two liaison organizations. The work of the main CCRI is supported by three “Sections” focused on metrology for particular aspects of ionizing radiation. In addition, eight Working or Task Groups were active during the period of this report, addressing particular issues in IR metrology. The Director of the BIPM Ionizing Radiation Department is the (*ex officio*) Executive Secretary of CCRI.

Strategy

The present CCRI strategy was developed by CCRI members in consultation with the wider ionizing radiation metrology community and by key stakeholders; it was first published in 2018. It was updated in June 2021, following another wide consultation, to reflect new developments in the field of ionizing radiation metrology and use in the stakeholder community. It also responds to the wider strategic review being undertaken by the CIPM that will be reported in detail at the 27th meeting of the CGPM.

The strategy sets out the main scientific, economic, and social challenges along with developments in science, technology and applications of IR that shape the work of CCRI. These lead to five high level strategic aims to:

- improve global comparability of measurements.
- build capabilities at smaller NMIs/DIs.
- progress the “state of the art” for issues identified by stakeholders of benefit to NMIs/DIs and the BIPM.
- expand the coverage of services supported by CMCs.
- coordinate the introduction of the SI Digital Framework in ionizing radiation metrology.

Notable activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Comparisons/CMCs

At the heart of CCRI activity is a significant programme of work to maintain the integrity, validity and utility of ionizing radiation CMCs, and to improve the fundamental data that underpin them. The CCRI has sought to remove barriers for NMIs submitting CMCs across all regions and at all stages of development. One important step, by the CCRI RMO Working Group on IR CMCs (CCRI-RMOWG), has been the establishment of an on-line course on how to enter a CMC claim for ionizing radiation metrology; now part of the e-learning training material provided by the BIPM.

The table below summarizes CCRI comparison activity in the dotation period 2020-2023 (including those scheduled for completion in the final year of the period) and compares this to activity in the previous dotation period (the years 2016-2019).

		Dotation Period 2020-2023				**Dotation Period 2016-2019**		
		Completed	In progress	Scheduled	**Total**	Completed	In progress	**Total**
CCRI	Key	1	2	2	**5**	4		**4**
	Supplementary	1	3		**4**	2	1	**3**
RMO	Key		8		**8**	6		**6**
	Supplementary	2	2	2	**6**	6		**6**
BIPM		24	35	28	**87**	54	10	**64**

These data show that the total number of comparisons for the present dotation period is expected to be significantly higher than 2016-2019. Much (although not all) of this rise reflects the large (and increasing) number of bilateral comparisons undertaken by the BIPM (~80 % of the total number). The importance and value of this, and other work of the BIPM Ionizing Radiation Department, was reflected in the response to the wide consultation undertaken as part of the CCRI strategy development.

There has also been a considerable increase in the level of publications related to comparisons[17].

In October 2022, the total number of ionizing radiation CMCs registered in the KCDB is 3 779, reflecting a small (~5 %) reduction compared to the number at the end of the last dotation period. This results from a rebalance among new CMCs in all three Sections and work to reduce/combine CMC categories (notably in Sections II and III).

More detail on this work (including the contributions of the BIPM) is provided below in the reports from the three CCRI Sections.

CCRI Section I: X- and Gamma-rays, Charged Particles (Chair: Dr Malcolm McEwen, Vice Chair: Dr Massimo Pinto)

CCRI Section I oversees a robust comparison programme that is centred on the BIPM ionizing radiation laboratories. BIPM.RI(I) Key Comparisons K1-K9 are all carried out as bilateral comparisons between the participating laboratory and the BIPM, and this continues to work very well. During this reporting period, it was agreed to launch a new Key Comparison – K9 – for the determination of absorbed dose to water for medium-energy x-ray beams. This addresses the continued use of such radiation beams in cancer therapy and recognizes that current uncertainties at the point of use can be significantly reduced through this new standard/comparison. Member organizations continue to work on standards for other beam modalities, specifically high-energy electron, proton and light ion beams, and the discussions are ongoing as to when it would be appropriate to launch Key Comparisons for these beams. One supplementary comparison was successfully carried out under the auspices of the CCRI(I) related to dosimetry for industrial processing (for example, sterilization of medical goods). A new feature of

[17] In the 3 years (2020-2022), the number of ionizing radiation comparison reports in *Metrologia* is already 25 % higher than for the whole 4 years of the previous period. Including publications in preparation this may rise to ~ 75 % by the end of 2023.

this comparison was that the pilot laboratory (NRC, Canada) was not a participant, allowing the section to better understand options for piloting future comparisons.

CCRI Section II: Measurements of radionuclides
(Chair: Dr Lisa Karam, Vice Chair: Dr Freda van Wyngaardt)

CCRI Section II comparisons have seen an expansion of global measurement support capabilities at the BIPM. This includes a greater variety of sources beyond ^{99m}Tc, ^{18}F, ^{64}Cu and ^{11}C (^{123}I, ^{153}Sm, with ^{13}N, ^{56}Mn, ^{68}Ga, and ^{166}Ho under development) measured by the travelling Système International de Référence (SIRTI), operated in a remote mode since 2021. Plans for regional "versions" of the SIRTI and expansion of BIPM measurement support to beta-particle emitting sources (with future work to alpha emitters) using the extended SIR (ESIR) are anticipated beyond 2022. Strategic planning of other radionuclide (activity) comparisons is done through the use of a sector-based cycling 10-year plan and the Measurement Methods Matrix (MMM).

Administratively, CCRI(II) has revised and reduced the number of service categories for radionuclide CMCs to optimize writing and review, and has prepared several interpretation documents ("Guidance on Applying the MMM in Using Comparison Results to Support CMCs", "The Interpretation of CMCs" in ionizing radiation, and "An Interpretation of CIPM MRA-G-11: Implications and Impacts for CCRI") to help put CIPM MRA guidance in context for ionizing radiation metrology, and is working on a proposal for how CMCs in radionuclide metrology might evolve to a method-based sorting approach from the current radionuclide-based sorting approach (reflected in actions of the RMO WG).

CCRI Section III: Neutron measurements
Chair: Dr Andreas Zimbal, Vice Chair: Mr. Neil Roberts

CCRI Section III is the forum for neutron metrology and has expanded in recent years to bring together most of the NMI/DIs active in this field. This is reflected in the increase both in the number of participants (notably due to the possibility of participation by videoconference), and also in the number of key or supplementary comparisons piloted by the CCRI(III) (with consequently limited activities and number of comparisons running at the RMO level): four comparisons completed or in progress over the period 2019-2022 and two planned to start in 2023-2024.

During the last four years, work has been undertaken to reduce the number of CMCs through focusing on the basic quantities of this field, with additional services (derived quantities) offered by the NMI/DIs being covered by their internal quality management system.

Another important task, arising from revision of the CCRI strategy, has been to develop a response to anticipated future needs for neutron metrology. These will require the development of new measurement methods, as well as new reference neutron fields, which, due to the need for increasingly large facilities, often have to be shared by several institutes. This mainly concerns high-energy (>20 MeV), high-intensity (for example, for BNCT or nuclear fusion) and pulsed neutron fields.

Responding to new challenges and opportunities

Alongside work related to maintaining the integrity, validity and utility of ionizing radiation CMCs; the CCRI community has sought to respond to new challenges from the stakeholder community and new developments in metrology. Once the challenge or opportunity has been identified, a common response is the establishment of Working Groups or (shorter term) Task Groups bringing together the necessary expertise from across the globe.

CCRI Radionuclide Therapy and Quantitative Imaging Working Group (CCRI-RTWG)

The CCRI-RTWG was formed in late 2019 to address measurement issues in the rapidly developing fields of radionuclide therapy and quantitative nuclear imaging. It brings together more than a dozen international experts in the fields of radionuclide metrology and nuclear medicine to develop and promote best practices in radioactivity measurement in the clinical practice of radionuclide-based therapy, including quantitative imaging and dosimetry.

To date CCRI-RTWG has led three BIPM webinars; most notably one entitled “Engagement Between NMIs/DIs and End-Users”. This brought together representatives from an NMI and the end-user community (physicians, physicists, regulators) from each of three different countries. The result was an increased insight into the needs of each side and a better understanding of how engagement between the communities can improve patient care. Feedback from all of the webinars has been used to develop the workplan for the Working Group for the coming years. This includes developing two guidance documents, on establishing and maintaining measurement traceability for quantitative imaging that contains specific guidance on phantom preparation and uncertainty assessment (expected mid-2023), and on measurement issues associated with the new class of alpha-emitter-based therapies.

CCEM-CCRI Task Group – Low Current Measurement (CCEM-CCRI-TG-LCM)

This Task Group was established in 2019, in collaboration with CCEM, to guide the introduction of new technologies for the measurement of low electrical current for ionization chambers, which are widely used in medical and radiation protection applications and are at the heart of NMI reference systems and the BIPM Système International de Référence (SIR).

In the electrical metrology community, the development of electron pumps in recent years has focused attention on small current metrology. The need to measure these currents for research purposes has driven a better understanding of existing low current systems as well as development of new systems. This new technology offers a number of benefits, including the potential for replacing most of the long-lived radionuclide sources (for example, ^{226}Ra) with stable current systems to monitor the stability of ionization chambers.

The Task Group brings together 18 experts in electrical measurement and radionuclide metrology, with the aim of developing and publishing a “best practice” guide for the use of the low current measurements for ionization chambers.

CCRI-CCQM collaboration on Mass Spectrometry in Radionuclide Metrology

Mass spectrometry (MS) methods have been used in various laboratories as a tool for the measurement of long-lived radionuclides, particularly in complex matrices for about 25 years. However, its use in radionuclide metrology (particularly at the NMI level) has to date been limited. The CCRI (led by Section II) has initiated a collaboration with the CCQM to investigate how MS might play a role in meeting some of the metrological needs in applications such as decommissioning and decontamination of nuclear/radiological sites, pollution monitoring and control, nuclear safeguards and forensics, impurity and interferences evaluation (especially in environmental and therapeutic nuclear medicine applications), and critical nuclear decay data for extremely long-lived radioisotopes.

Initial work has included meetings to present and understand the needs and expertise of the two communities, a survey of the current status of mass spectrometry in the CCRI community and a webinar to understand work currently under way at some of the NMIs/DIs and future plans (including research proposals). A workshop is planned for February 2023 to bring together the CCRI and the CCQM communities to discuss possible uses, potential benefits, and challenges in extending the use of MS to the radionuclide community.

CCRI Task Group on radioactive sources and alternative technologies (CCRI-TG-RS)

A Task Group was set up by CCRI(I) in 2021 in response to the increasing regulatory burden on large radionuclide sources, which are a critical component of the ionizing radiation metrology infrastructure. There are increasing regulatory pressures that may mean certain key isotopes will be more difficult to obtain and/or operate within metrology laboratories, highlighted in a report from the US National Academies of Science on this topic[18]. At the BIPM the plans to access the IAEA Cs-137 source rather than install a facility at Sèvres, and moves to minimize other source holdings, are a response to this long-term trend. This TG aims to produce a report for consideration by the CCRI, on the implications and options for ionizing radiation metrology, in 2023.

Communications

The constraints on in-person activities due to the Covid-19 pandemic from 2020 into 2022 impacted the work of the CCRI, with events cancelled and meetings moving on-line. However, it also catalysed the development of new virtual mechanisms for communication and involvement of the ionizing radiation community and provided the stimulus to explore new communication tools to support its mission and to review its approach to communications. This included a series of webinars that brought together stakeholders and metrologists from across the globe. These webinars have enabled knowledge transfer, reviews of state-of-the-art in specific fields and have also provided a forum for stakeholders to share their measurement challenges and metrologists to share their response. A total of 1 277 individuals from 89 states and economies have participated in 17 webinars to date.

The CCRI has convened the CCRI Communication Working Group (CCRI-COMWG) to ensure it can continue to use these and other (in person and virtual) mechanisms to support the CCRI mission. In particular, as the world emerges from the pandemic restrictions, it will be necessary to understand the benefits/drawbacks of different modes of communication, training and meeting formats. For example, how to best balance the inclusivity of virtual meetings with the depth of face-to-face communications.

Outlook in the short and long term

The CCRI continues, through direct liaison and through the wider network of its Members, to understand the evolving needs of its stakeholders and end-users. The CCRI will continue to respond to these challenges, to embrace new metrological science and technology and to support NMIs who are seeking to enhance their capabilities in IR metrology.

The following activities, which are examples of this response since 2018, are expected to continue in the short/medium term:

- The work of the CCRI-RMOWG on CMCs optimizing the scope of ionizing radiation CMCs to maximize their value without placing an unreasonable burden on the community to maintain them.
- The work of the CCEM-CCRI-TG-LCM and of the CCRI-RTWG.
- The work of the CCRI-TG-RS.
- Further development of work with CCQM on the application of mass spectrometry in ionizing radiation metrology, including a workshop planned for February 2023.
- The work of the CCRI-COMWG to harness established and new communication tools to support the CCRI's mission.

[18] "Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies;" 2021 report from the US National Academies of Sciences, Engineering and Medicine

Other challenges which it is anticipated will need to be addressed in the coming years include:

– Understanding the implications of the Digital Revolution for ionizing radiation metrology and coordinating the introduction of the SI Digital Framework in ionizing radiation metrology. Technical challenges include determination of how the SI Digitalization Framework can be integrated into the established use of digital technologies in ionizing radiation metrology and in applications of ionizing radiation, and how CCRI members can expand the use of digitalization technologies (for example, comparison reports including digital data, electronic calibration certificates) in serving the stakeholder communities. The CCRI is establishing a Digital Task Group to address this challenge, and to provide a link to the overall Digital-SI programme of the CIPM. Its first meeting is planned for 2023.
– In the longer term, the CCRI is anticipating a resurgence of interest in some countries in nuclear power, with innovative (for example, Small Modular Reactor) designs. There are also a number of national and international programmes seeking to accelerate the transition of fusion power from R&D to commercial application. Both of these will require metrological support.

Strategies are living documents that need to reflect the changing global context that the above examples illustrate. Hence, the CCRI Strategy will be reviewed again over the next few years, in parallel with the development of the wider strategy and vision work of the CIPM, before the 150th anniversary of the Metre Convention in 2025.

CCRI Data

CCRI set up in 1958 (From 1958 to 1999 the committee was under the name CCEMRI)

President:	M. Sené
Executive secretary:	V. Gressier (Dr S. Judge prior to June 2021)
Membership:	13 members, five liaison organizations and ten observers
List of CCRI members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccri/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	7 June 2019, 8-10 June 2021
Full reports of the CCRI meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccri/publications

The work of the main CC is supported by three “Sections” focused on metrology for the particular aspects of ionizing radiation:

– CCRI Section I X- and gamma rays, charged particles
– CCRI Section II Measurement of radionuclides
– CCRI Section III Neutron Measurements

Eight Working Groups: https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccri

– CCEM-CCRI Task Group - Low Current Measurement (CCEM-CCRI-TG-LCM)
– Section I: Brachytherapy Standards Working Group (CCRI-BSWG(I))
– Communication Working Group (CCRI-COMWG)
– Section I: Key Comparisons Working Group (CCRI-KCWG(I))
– Section II: Key Comparisons Working Group (CCRI-KCWG(II))
– RMO Working Group on IR CMCs (CCRI-RMOWG)
– Radionuclide Therapy and Quantitative Imaging Working Group (CCRI-RTWG)
– *ad hoc* Working Group on Strategy (CCRI-SWG)

The President thanked Dr Sené for his presentation.

22. Report on BIPM Finance

Dr Richard, Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance (FSC), gave a report on the financial management during the current dotation period (2020 to 2023) and the proposed budget for 2024 to 2027. He said that the financial management by the BIPM in the current dotation period has been exemplified by the good management by the Director and his team and by the 2020 and 2021 accounts being submitted and audited on schedule. The financial report for each year is approved by the CIPM through the FSC and is audited by an external auditor from KPMG.

Dr Richard said that the historic accumulation of arrears has now been addressed. A practice was in place up to and including 2012 that resulted in states not being excluded after six years of arrears. They remained in an open-ended period of suspension, during which time they did not benefit from any advantages or prerogatives, and were considered to be accumulating arrears. This practice was in contradiction to Article 6 of the Regulations Annexed to the Metre Convention and was stopped in 2013. The CIPM considers that the total amount paid by every Member State throughout this period was correct and no debt has been written off. The BIPM has not received any amount larger than it should have done, and the total amounts paid by all (non-defaulting) Member States have always been correct. The external auditor (KPMG) validated this conclusion and the CIPM published decision 111-08 (2022) that completed the process. He repeated that the solution to this issue, which was a complex and detailed subject, has no effect on payments by Member States or on the BIPM finances.

Dr Richard returned to the financial management in the current dotation period (2020 to 2023), commenting that performance to date has been better than the agreed budget. The agreed work programme has been delivered in full and within the budget. This includes a strategic and planned approach to building maintenance at the BIPM and capital expenditure; including both IT software and hardware infrastructure. The global Covid-19 pandemic resulted in savings against the budget, specifically 697 000 euros in 2020 and 821 000 euros in 2021. The savings were in the areas of meetings, travel, transport and secondees. These savings enabled the CIPM to make an injection of 3 million euros into the BIPM Pension Fund.

The proposed budget for 2024 to 2027 was presented. Dr Richard recalled that it had been developed by the BIPM Director and the BIPM Finance Office. He noted that the proposal for the detailed long-term financial plan is directly driven by the BIPM Strategy for the work programme. The CIPM has specified that the funds be used efficiently according to the following four points:

- Cost savings will be identified in the laboratory operating and investment spend.
- Off-site facilities will be used when financially beneficial.
- Preference will be given to new staff appointments on a 5-year contract.
- Use of secondments will be maximized where possible.

Dr Richard gave a summary of projected expenditure for 2024 to 2027, noting that a number of key assumptions were made during the development of the budget. It was assumed that the annual increase in the salary mass will be 1.8 % to cover promotions and progression along the scales. This assumption is before any allowances for inflation. The assumptions for annual inflation applied to salaries, allowances and healthcare are 3 % for 2024 and 2025 and 2 % for 2026 and 2027. The assumptions for Annual inflation applied to contract services and utility costs are 6 % for 2024 and 2025 and 4 % for 2026 and 2027.

The 2024 to 2027 budget period includes assumptions for the staffing requirements of the BIPM, which account for a significant part of the budget. The requirements for extra staff in digital transformation activities will be met by efficiency savings in staff deployment in certain support roles. The recruitment plan for 2024 to 2027 will correct for key retirements. The plan includes actions to re-organize staff

and operations to increase effectiveness in the delivery of the work programme and continues the policy of preferring recruitment to fixed-term contracts. In addition, the CIPM will consider options for outsourcing certain functions, and new mobility arrangements to encourage the exchange of staff between the BIPM and NMIs.

Dr Richard said that the CIPM has reviewed the long-term financial plans and the underlying financial assumptions and on the basis of these plans and assumptions requests an increase in the dotation for the period 2024 to 2027 of 1.5 % each year. He presented the figures for the annual dotation, which have been included in the text of Draft Resolution V "*On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027*". He reminded the delegates that there will be an opportunity to ask detailed questions at the closed afternoon session for representatives of Member States on 16 November.

The proposed 1.5 % annual increase in the dotation for 2024 to 2027 includes 1 056 000 euros for new digital transformation projects and secondees at the level of 7.4 full-time equivalents (FTEs) for each year of the 4-year period. Dr Richard stressed that the dotation proposal is for "zero net growth" and the number of staff at the BIPM Headquarters will not increase over the period 2024 to 2027. In order to sustain zero net growth with an annual dotation increase of 1.5 % during a period of high inflation it will be necessary to make cost savings in laboratory operating and investment spending to maintain them at the same level (in cash terms) for the 2024 to 2027 dotation period as for the current period. In addition, energy saving measures will be taken to reduce the cost of electricity and gas usage for building heating and climate control.

Dr Richard said that the budget for 2024 to 2027 has been developed using reasonable and informed assumptions, however the assumptions are dependent on future inflation, which is difficult to predict. A financial "stress test" has been carried out to determine what would happen if inflation is worse than the best assumptions that were used and what would happen if a 1.5 % annual increase in the dotation is not agreed. Details of the "stress test", the different assumptions and the consequences were presented in the CGPM Working Document.

The President thanked Dr Richard and said that there will be an opportunity to ask questions during the closed session. Mme Chambon (France) thanked the CIPM for its vigilance in preparing the budget and the BIPM Director for presenting a budget which is reasonable with a work programme which is quite ambitious.

23. Presentation of the BIPM Work Programme for 2024-2027

Dr Milton, the BIPM Director, highlighted the three preparatory documents for the 27th meeting of the CGPM in particular the "CGPM Working Document, October 2022", which includes sections that summarize progress made with the 2020-2023 work programme, the proposals for the BIPM Work Programme 2024-2027, and the proposal for the dotation for the period 2024-2027. Full information is available in the document "Proposals for the Work Programme of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024-2027". The proposals for the BIPM financial plan (2024-2027) were developed by the BIPM Director and the CIPM FSC Chair and reviewed by the CIPM at a virtual meeting in March 2022.

Dr Milton gave the background to the development and consultation process for the three documents and how he had collaborated with the CIPM to finalize the documents. The first element in the development of the "Strategic Plan for the BIPM Work Programme (2022)" was to use data from the ten Consultative Committee (CC) strategies and the CIPM strategy to develop the Draft Strategy for the BIPM Work Programme (2022) in April 2021. He commented that the development of the CC

strategies involved an investment of time by NMI staff and the strategies represent a useful resource for many applications beyond their use in establishing the Work Programme strategy. The Draft Strategy for the BIPM Work Programme underwent a review by the CIPM Sub-Committee on Strategy and was subsequently opened for review and comments. The document was presented to the 27th CGPM as the "Strategic Plan for the BIPM Work Programme (2022)".

Dr Milton said that the starting point for development of the "Strategic Plan for the BIPM Work Programme (2022)" was to implement the objectives for the BIPM that were agreed in Resolution 3 of the 26th meeting of the CGPM (2018). In summary, the objectives were to represent the global measurement community, to be a focus for scientific and technical collaboration, and to coordinate the world-wide measurement system through actions such as the CIPM MRA database. The objectives should be underpinned by actions in capacity building and knowledge transfer. He said that at the outset is was agreed that to motivate and develop the strategic plan, some key challenges should be addressed, in particular: the challenges and opportunities afforded across all areas of the BIPM triggered by digital transformation; the opportunities identified in the CC strategies; the continued need to operate according to a "new normal" by using new ways for BIPM staff to interact with NMIs, RMOs and other key stakeholders and to bring those tools and modes of interaction into making the work of the BIPM as efficient as possible; and the incorporation of capacity building and knowledge transfer activities in every part of the work programme. The draft strategy document was published and opened for review in September and October 2021. Comments were received from eleven NMIs and replies were sent to each to explain how the strategy would be adapted in response to their comments. The strategy document was subsequently reviewed and approved by the CIPM.

Development of the "Proposals for the Work Programme of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024-2027" considered the following priorities: to identify the highest-value activities required by Member States; to review the technical work needed at the BIPM Headquarters in physical metrology following the decision to redefine the base units of the SI at the 26th CGPM (2018); to balance the resources committed to the three strategic objectives (liaison, technical collaboration and coordination) with the capacity building and knowledge transfer activities and the new digital transformation activities; and to develop a sustainable long-term financial plan through to 2027. Dr Milton stressed that the foundation of BIPM Headquarters' activities will continue to be the work of staff carrying out liaison, coordination and technical collaboration, with technical activities limited to those where the BIPM Headquarters has a distinctive role and that provide direct support to many, or all, Member States. The draft document was made available for consultation in May and June 2022. Eight NMIs commented on the draft Work Programme and the revised proposals were sent to the CIPM for approval.

Dr Milton said that the "Proposals for the Work Programme of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024-2027" includes 145 tasks. The BIPM Headquarters plans to be able to deliver all of the tasks presented in the consultation if the 1.5 % increase in dotation is agreed. He presented highlights from the Work Programme for each department. The Physical Metrology Department will continue to coordinate the comparison of primary realizations of the kilogram and maintain the consensus value for dissemination from the BIPM working standards. It will develop a graphene-based quantum Hall resistance standard for reduced cost and simplified transportable on-site comparisons. The Time Department will develop and use the best time and frequency transfer methods to introduce new optical frequency standards into UTC, also in support of the roadmap to the redefinition of the SI second. The department will work together with the ITU and other international organizations and stakeholders to agree on a future continuous UTC, according to Draft Resolution D. The Chemistry Department will provide five new on-demand comparisons for greenhouse gas and air quality standards and will extend the range of organic standard comparisons and knowledge transfer

activities from small molecules to monoclonal antibodies. The Ionizing Radiation Department will extend the off-site comparison services to a new priority field in response to the increasing use of new radiation fields in radiotherapy. In addition the department will launch the next-generation International Reference System (SIR) for comparisons of gamma-emitting radionuclides, using new low-current measurement technologies to address applications in nuclear medicine and environmental monitoring.

Dr Milton presented a graph showing targets and historic data for participation in the BIPM's activities from the previous Work Programme (2016-2019), the current Work Programme (2020-2023) through to the next Work Programme (2024-2027). He noted that participation measured by the number of comparisons coordinated and calibrations carried out varies according to the department. There is an almost linear increase in the number of comparisons coordinated and calibrations carried out for the Physical Metrology Department from the previous to the next programme. The challenge in the Time Department is not principally concerned with incorporating new clocks into the system but is how to broaden capacity building activities to support laboratories that are new to UTC to allow them to incorporate their data into the system as easily and accurately as possible. The Chemistry Department is expecting a further increase in participations and there has been a significant increase in new comparisons of isotopes of CO_2. An increase in participations is projected for the Ionizing Radiation Department; its participations in the 2020-2023 period were adversely affected by the limited availability of an off-site facility for 18 months during the Covid-19 pandemic.

The key point from the proposed work programme in the area of coordination and international liaison is to explore models that facilitate participation of those states not yet participating in the activities of the BIPM in support of Draft Resolution F "*On universal adherence to the Metre Convention*". This will entail research into how other organizations engage with non-participating states and discussions with existing Member States to determine the way forward to implement the Draft Resolution. In addition the BIPM will continue to work with UNESCO to raise the profile of World Metrology Day by having it formally recognized as an annual UNESCO event. The 42nd session of the UNESCO General Conference in November 2023 is expected to ratify the decision to formally recognize World Metrology Day. In the area of communication and promotion, the BIPM will work to ensure that the website continues to deliver services effectively and portrays an up-to-date image of the BIPM including the launch of an external digital repository using Digital Object Identifiers (DOIs) to aid machine accessibility. In addition, the BIPM will start planning the special events to celebrate the 150th anniversary of the signing of the Metre Convention on 20 May 2025.

The requirements for digital transformation and new digital services grew rapidly during the development of the Work Programme. Key points are the development of a set of new high-quality web services that provide access to the data provided by the BIPM website. For example: application of the FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Re-usable) principles to the KCDB and development of the SI Reference point, a structured digital version of the SI Brochure.

Dr Milton said that it is necessary to distinguish between "core" capacity building initiatives that are supported by the Work Programme and "sponsored activities" that are supported externally when planning the Work Programme for the capacity building and knowledge transfer (CBKT) programme. Key points from the proposed work programme in the core CBKT area include support for the JCTLM through workshop and laboratory placements as well as development of e-learning material to enhance the quality and recognition of laboratory clinical testing globally. Additionally, there will be new support actions for the generation of the international reference timescale (UTC) aimed at increasing the quality of the input data and thus the quality of the timescales, and topic-based workshops identified with the RMOs as being of the highest priority in their regions. He recalled that the e-learning platform now hosts material from four of the six RMOs.

Sponsored CBKT activities are led by the intentions and preferences of the sponsor for the activities concerned and include opportunities for laboratory-based placements across all BIPM departments. There is a distinction in planning the sponsored activities between capacity building, where the secondee is a prime beneficiary of the action, and knowledge transfer, where the secondee benefits and also supports delivery of the BIPM Work Programme during the placement. Targets have been set for the CBKT work in the Work Programme 2024-2027 of at least 440 NMI/DI staff expected to attend courses and workshops. Around 400 participations are expected in on-line workshops and 500 participations in e-learning. The Work Programme anticipates 67 laboratory placements at the BIPM Headquarters, totalling around 34 person months, and 40 laboratory placements at partner NMIs/DIs. Dr Milton noted that the BIPM partners with NMIs that want to host capacity building activities to provide course materials and lecturers.

He summarized the BIPM Work Programme for 2024-2027 by saying that the proposed activities are ambitious and depend on the work of visiting scientists and specialists working alongside BIPM staff for their delivery. The participation of visiting scientists reduces costs, brings in specific expertise when it is needed, injects new ideas, and provides flexibility in staffing. It has been found that visiting scientists also bring a new team ethic into the laboratories, which is highly appreciated. The proposals for the Work Programme include capacity building and knowledge transfer activities in all areas, which will be expanded by securing sponsorship from NMIs, Member States and RMOs, or other bodies. New projects will enable the digital transformation of the BIPM's services in support of a digital transformation agenda being led by the CIPM for the global metrology community. Finally, the BIPM will continue to enable scientific and technical collaboration between Member States providing capabilities for international measurement comparisons on a shared-cost basis.

The President thanked Dr Milton and invited questions and comments. Dr Louw, the CIPM President, commented that the Strategy for the BIPM Work Programme discussed is separate to the "Report on the actions taken by the CIPM towards a "CIPM Strategy 2030+"". Mr Mohamed Ahmed Al Mulla (United Arab Emirates) commented that leading by example with the digital transformation is a very good thing and asked how the digital transformation in the laboratories will be disseminated to other national metrology organizations. Dr Milton replied that the policy being pursued within the organization and the laboratories, is for digital transformation actions to take place among the laboratory staff. The BIPM will not set up a digital transformation group separate to the laboratory staff, because the digital transformation is a transformation of the services in all of the BIPM Headquarters. The output will be disseminated through the Consultative Committees.

24. Report on liaison activities from the OIML

Mr Anthony Donnellan, BIML Director, said that the International Organization of Legal Metrology (OIML) is an international intergovernmental organization with a mandate that comprises four main pillars: the development of technical publications and technical regulations for adoption within its Member States; harmonization of the international certification system for type approval of measuring instruments; capacity building and outreach with international economies with emerging metrology systems; and international engagement. His presentation focused on laying the foundations for the future of the OIML and the future of international metrology, specifically international legal metrology.

The OIML is orientating itself to develop and implement more adaptive, flexible, and fit-for-purpose standards. This will allow the OIML to respond to evolving consumer needs and industry preferences. This is crucial due to the fast-paced and moving environment. The high-frequency review, revision and

renewal of OIML publications is required to accomplish this aim. To lay the foundations for its future, the OIML will continue to position itself as a leading international standard-setting organization; this will be achieved by working actively with its Project Groups, Technical Committees and stakeholders.

Mr Donnellan presented an overview of appointments that were approved at the 57th meeting of the International Committee of Legal Metrology (CIML) in October 2022. Dr Roman Schwartz confirmed that he will step down as CIML President at the 58th CIML Meeting in 2023. The CIML elected Dr Bobjoseph Mathew, CIML Second Vice-President as CIML President for a six-year term starting at the 58th CIML Meeting. Mr Jaco Marneweck was appointed Chairperson of the Advisory Group on matters concerning Countries and Economies with Emerging Metrology Systems (CEEMS AG) and Mr Han Jianping was appointed Vice-Chairperson. Dr Sascha Eichstädt was appointed Chairperson of the OIML Digitalisation Task Group (DTG) and Dr Ping Yang was appointed Deputy Chairperson.

The signing of the Joint Statement of Intent "On the digital transformation in the international scientific and quality infrastructure" by the OIML in March 2022 represented a further step towards preparing the OIML for the future. The joint statement gives direction to the work of the OIML DTG and how the international Quality Infrastructure is organized and its priorities for the future. The joint statement will allow the OIML to implement the principles it needs to transform the organization from a digital perspective and the way it develops its publications. To encourage digital openness, equality, communication and cataloguing, the OIML is embracing the Findable, Accessible, Interoperable and Reusable (FAIR) principles. The OIML DTG consists of 15 representatives from OIML Members and international and regional organizations who provide their views and input as to how the digital transformation of legal metrology can evolve and mature. The OIML DTG will support, coordinate and promote the international harmonization and implementation of digital transformation in legal metrology.

Mr Donnellan said that cooperation with the BIPM is a central pillar of the work carried out within the OIML. The document OIML D 1 "National metrology systems – Developing the institutional and legislative framework" is now a joint publication between the two organizations. This publication details the framework for the necessary infrastructure required at a national level, or recommended at a national level, for states to follow. Other areas where the OIML cooperates with the BIPM include: collaboration with organizations in liaison; shared messaging, representation and resourcing; World Metrology Day and the bid to have it recognized by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) as a World Day of Metrology; digitalization and the digital transformation, particularly related to common elements of work carried out in physical metrology and the legal and documentary aspects of metrology; the joint statement; and organizational, corporate and governance matters. In addition, the executives of the two organizations maintain a regular dialogue and Joint Task Group meetings have been convened to discuss the strategic focus, including interaction with the international quality infrastructure. He commented that engagement with the International Network on Quality Infrastructure (INetQI) is ongoing and that the OIML provides the IT infrastructure for the INetQI.

The OIML and BIPM are involved in profile-raising activities, including the previously mentioned joint OIML-BIPM proposal to UNESCO for a World Day of Metrology. There has been direct coordinated liaison with UNESCO and its Member States through representation made to embassies and permanent missions to advance the joint proposal. The OIML and BIPM have both actively contributed to the OECD Partnership of international organisations for effective international rulemaking (IO Partnership). The OIML has contributed examples of best practice to assist other IOs, as well as taking best practices from other members of the group, which have been applied through institutional and governance arrangements.

Mr Donnellan concluded his presentation by saying that e-Learning is a critical part of the OIML's work and it interacts with the BIPM on a number of initiatives. This interaction includes cross-

referencing and sharing of e-Learning material and working with the RMOs and Regional Legal Metrology Organizations (RLMOs). Work has started on the development of a joint OIML/BIPM e-Learning module on D 1. He handed over to Dr Bobjoseph Mathew, President-Elect of the CIML.

Dr Mathew said that it is important to demonstrate the relevance and impact of the OIML's work. For example, international standards are most effective when they are widely accepted, trusted, inclusive and implemented by the community affected by them. There is an additional need to show how the OIML can have an impact in daily life to build confidence in the overall metrology system and the associated regulatory framework. The relevance of the OIML's work can be shown through improved alignment with and mapping to the Sustainable Development Goals (SDGs), for example in the area of affordable and clean energy. The OIML and BIPM participated in the mapping of metrology functions exercise with UNIDO through the publication "Quality Infrastructure for Sustainable Development (QI4SD)" Index. The Index considered five dimensions (accreditation, policies, standards, conformity assessment and metrology) to benchmark the importance and worthiness of investing in QI.

The OIML is working to raise the profile of its standards in parallel to increasing their accessibility and reducing their complexity, for example the OIML Certification System (OIML-CS), a system that certifies test reports based on OIML recommendations, which reduces barriers to trade. The OIML will promote the adoption and implementation of international standards within the IO and international QI domains and will engage with its Members to do the same. It will consult with industry and stakeholders to obtain feedback on which standards are essential, their accessibility and which standards need to be revised or consolidated. These approaches will demonstrate the ability of metrology to contribute to and shape policy, legislation and international rules and for the metrology sector to be an active and trusted partner in this dialogue.

Dr Mathew summarized by saying that the OIML will raise awareness of its contribution to the legal metrology infrastructure to attract new members. It will continue to deepen its cooperation with other IOs, including the BIPM, ISO, IEC and ILAC. Mutual confidence will continue to be promoted through the OIML-CS. The exchange of technical expertise will be advocated with emerging economies. Initiatives on the digitalization of legal metrology will be advanced. The consideration of the SDGs will be fostered in the work of the OIML. He concluded by emphasizing the pivotal role of the OIML community in progressing the issues of global trade, consumer protection and sustainable development. By working together the OIML and BIPM can promote the relevance of their work and can achieve more.

The President thanked Mr Donnellan and Dr Mathew and opened the floor to questions and comments.

Dr Laiz (Argentina) welcomed the formation of the OIML DTG and commented that an important challenge for legal metrology will be how the digital transformation and move to cloud-based services will affect the evaluation and verification of legal instruments. He commented on the coordination between the OIML and ISO, particularly the potential differences between ISO standards and OIML recommendations, which can cause problems for NMIs that have to evaluate instruments. He asked if there is to be coordination between the OIML recommendations and ISO standards for instruments.

Mr Donnellan replied that the OIML's digitalization work is focusing on digitalization "from the ground up". The OIML will look at how to make its standards relevant to industry, practitioners and regulators within the framework of being machine readable, machine actionable and available in the cloud. This will require consideration of aspects such as direct verification and recalibration of measuring instruments with this functionality in the future. The OIML is considering all these concepts from a digitalization perspective. Mr Donnellan commented that there is a need to transcend the notion of simply producing documents in PDF or XML format. There is a critical need for direct exchange of data that will incorporate self-verification and self-calibration in the future. It will be necessary to ensure that appropriate safeguards are included in this work.

Dr Mathew added that the digital transformation will consider the technical evolution in each of the economies and highlights the importance of obtaining contributions from all stakeholders to allow priorities to be established. There is a challenge for the Chair of the OIML DTG to find the right group and to possibly create sub-groups to address specific challenges. With regard to the second question, he replied that there is always a challenge to make sure that there is no duplication and that there is harmonization between standards, not only with ISO, but with other organizations with which the OIML collaborates such as the IEC. The OIML invites ISO, and other organizations, to liaise with it when new standards and technical regulations are developed. He added that there is an opportunity to harmonize, rationalize and potentially reduce the number of standards that are available. It is imperative for the OIML as an organization, and for its project groups and project group leaders to involve all stakeholders as part of its collaborative efforts. This is carried out at a management level through the annual quadripartite meeting of the BIPM, OIML, ILAC and ISO. This meeting provides a forum to share views on strategic matters. There is an emphasis on collaboration at the operational and technical committee level.

Mr Donnellan added that there is always room for improvement.

25. Standardization, industrialization and the UN Sustainable Development Goals

Dr Yuko Yasunaga, the Managing Director of the Directorate of Corporate Services and Operations at UNIDO, said that the world is full of challenges and that it is necessary to look at the realities of dealing with these challenges. Today's innovators are expected to tackle many societal challenges including global warming, environmental pollution, poverty and poor nutrition in some countries, secure supplies of food, water and energy, peace keeping and prevention of infectious diseases. Many of these problems are caused by "market failure", or in other words, "the invisible hand does not work". The United Nations adopted an approach to tackling the societal challenges as the 2030 Agenda for Sustainable Development, including the Sustainable Development Goals (SDGs) in 2015, following the recognition that a new mechanism was needed to tackle the challenges. There are seventeen SDGs with 169 individual targets; almost seven years have elapsed since the adoption of the SDGs and almost eight years remain to achieve the goals in 2030.

Dr Yasunaga presented specific examples of the situation regarding the SDGs. In 2016 the global situation regarding hunger found that many people were experiencing serious undernutrition. In many countries, particularly in Africa, 40 % to 60 % of nationals were undernourished. In 2015, 181 countries had achieved over 75 % coverage of basic services for drinking water, but many countries in Sub-Saharan Africa and in some Asian countries, such as Myanmar and Cambodia, there was a poor level of accessibility to drinking water services. In 2018 there were 29 countries where less than 50 % of the population has access to electricity. Of these 29 countries, 27 were in Sub-Saharan Africa.

Development of environmental protection is a major priority for UNIDO and the entire world. Developing countries have experienced high economic growth, high population growth and a high concentration of the population in cities. This can lead to waste management problems. Some industrial policies can lead to environmental challenges and large-scale environmental destruction, for example the loss of the Aral Sea, which has almost dried up as a result of over irrigation due to a policy introduced by the Soviet Union to boost cotton production and exports. Other challenges include the phasing out of hydrofluorocarbons (HFCs) and hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) and how to help industry abolish the use of mercury, based on the Minamata Convention.

Dr Yasunaga gave the background as to why the UN needed to promote the SDGs in the form that they are presented. The UN had learned through experience that promotion using conventional methods,

such as assistance, could not solve the problem quantitatively and qualitatively. However, if goals are defined, they must attract the attention of investors and as more investments are made, a solution to the problems must be driven. He said that to achieve the SDGs with the help of private investments, it was necessary to approach the problem from a different angle. The paradigm shift required was a move from corporate social responsibility (CSR) to a business-oriented approach. This approach means that it is now acceptable for private companies to make money by contributing to the achievement of the SDGs. It can also lead to the creation of new business sectors or new business opportunities. In Japan, there is a business philosophy known as "Sanpo-yoshi", which means three-way satisfaction: "good for the seller (profitable), good for the buyer (convenient) and good for society (society's welfare)". Dr Yasunaga said that it may be necessary to add an additional criteria; the need to be sustainable or "good for the future".

Dr Yasunaga presented the potential barriers to the challenges, with particular reference to African countries. In many African and other developing countries there are different boundary conditions to those in developed countries in terms of technology transfer activities; there are many challenges, but also many opportunities. It may be possible to simplify or simply duplicate past experience in developed countries to create new business models or societal systems that work very simply in African and other developing countries. He gave the example of the challenges facing the introduction of solar power generation for villages in Africa that are without any electricity. There are technological challenges and there is a need to assess the hours and intensity of available sunlight. There are business challenges, which can be overcome by using micro-payments for electricity via smartphones to simplify billing. There is also a societal challenge in how to build a sustainable system for everyone. He gave a brief summary of the stereotyped views on why it is perceived that there is "no innovation from Japan" and in other countries around the world and their potential as barriers to overcoming the challenges.

Dr Yasunaga explained why metrology is an essential component in solving the challenges associated with the SDGs. New measurement methodologies and technologies are essential for developing and maintaining new infrastructure. They also support the development of new industries. The development of new measurement methodologies requires new technologies and the requirements for new measurement methodologies drives development of these new technologies, which in turn lead to more precise measurements. New measurement methodologies and technologies can help people to familiarize themselves with new products and services. He gave an example of the role of metrology in the development of new energy infrastructures, focusing on the hydrogen economy. Solar-rich and wind-rich countries, for example many countries in Sub-Saharan and Southern Africa, have the potential to become the "world's powerhouse" in the hydrogen economy. Metrology will have a key role in development of the hydrogen economy as precise measurement of volume, temperature, pressure and flow rate are core elements of ensuring a safe transition to hydrogen and to ensure safe handling. The emerging technologies associated with the hydrogen economy form the basis of potential new energy industries, which offer the possibility for large-scale youth employment. A further example is the role of metrology in solving the problem of marine plastic pollution through the use of biodegradable plastics. A standardized method of measuring biodegradability is needed in a way that is consistent with the objective of stopping marine plastic pollution. In addition, a standardized method is required to accredit that a plastic bag is made from biodegradable plastics in a way that is recognizable to consumers.

UNIDO has been promoting metrology for industrial development in developing countries and those with emerging economies. For example it organized an AFRIMETS Legal Metrology School in Tunisia and the first metrology school for African countries, which was hosted by Kenya. UNIDO has a strategic partnership with the BIPM and OIML and for World Metrology Day 2017 it issued a brochure entitled "The role of metrology in the context of the Sustainable Development Goals 2030".

Dr Yasunaga's final message was that the metrology sector should pursue collaborations, including those with other areas. Cross-boundary collaborations will allow many technological areas, many scientists and many visionaries to interact in a coherent way and will lead to convergence on solving the challenges of the SDGs. The key message is "let's work together".

The President thanked Dr Yasunaga and invited questions.

Dr Pinto (Italy) asked to what extent gender equality is implicated in solving some of the challenges associated with the SDGs and whether gender inequality may have added to the global emergencies. He added that gender equality should possibly be considered for elevation to the status of a global emergency alongside others such as tackling hunger. Dr Yasunaga replied that gender equality is one of the SDGs [*Achieve gender equality and empower all women and girls*]. Each SDG has a gender equality aspect and this needs to be considered from the innovation stage through to developing methodologies. Improving gender equality is a horizontally-shared task among the SDGs. He gave two examples of how access to clean water and sanitation are vital for gender equality. In many developing countries it is women and children who are often required to travel long distances to access water supplies, a problem which could be resolved by improving access to clean water. It is also essential to provide adequate sanitation in schools in order to encourage women to attend to improve their educational opportunities. Prof. Flandrin commented that the digital transformation will have impacts across society and asked if there is a method that can be used to evaluate and compare the impacts of the use of digital technologies and if metrology should be involved to provide unity. Dr Yasunaga replied that the digital transformation can provide developing countries with the chance to promote industries in a short time and this will require education and training. UNIDO would like to promote training and education in the area of the digital transformation, so that developing countries will not lose opportunities to develop industries that evolve from digitalization.

26. Report on progress towards the recognition by UNESCO of World Metrology Day

Mr Rysbek Alibekov, a representative from the Kazakhstan Embassy in Paris stated that Kazakhstan, together with strong support of the BIPM team, were delighted to submit a proposal to the 215th session of the UNESCO Executive Board to proclaim World Metrology Day as a UNESCO World Day. Winning support at this meeting was a key step and a decision should be adopted at the UNESCO General Conference in November 2023.

Mr Alibekov thanked Dr Milton, Dr Donnellan, Miss Guliyeva, Mr Henson and Mr Kuanbayev for their support and help. He underlined that during the campaign of collecting support for this initiative, it was asked several times why Kazakhstan took the lead of this initiative.

First of all, the country's economy and society have undergone deep transformations since independence. One of the key drivers bringing the country's economy into the global arena is aligned national metrology infrastructure with the global metrology framework, led by the BIPM and the OIML.

Secondly, the state programme of industrial and innovative development of Kazakhstan provided for the creation of the national metrology infrastructure, comparable and recognisable world-wide.

Today Kazakhstan actively participates in the activities of the BIPM and OIML, and it should be emphasized that the Kazakh metrology system contributes to the economic performance of the country and improves the quality of life of its citizens. It shows how important metrology is for an economy and its people.

The 20 May 1875 was symbolic for the world. Nations came together and signed the Metre Convention formalizing international cooperation in measurements and science. However, the importance of metrology is not sufficiently recognized outside the specialist community.

On behalf of Her Excellency, Mrs Gulssara Arystankulova, the Ambassador of the Republic of Kazakhstan to France, Mr Alibekov congratulated all involved for the productive and successful work.

The President thanked Mr Alibekov for this initiative.

Dr Louw thanked Mr Alibekov on behalf of the organization and the delegates for taking the initiative forward and spearheading it for the BIPM at UNESCO. He added that everyone is looking forward to final adoption, which may take place at the UNESCO General Assembly in 2023. Dr Louw also thanked the delegates for mobilizing their governments, and all the nations that supported this initiative.

27. Introduction to Draft Resolution F "Universal adherence to the Metre Convention"

Dr Alan Steele and Dr Angela Samuel gave a joint presentation on Draft Resolution F "*On universal adherence to the Metre Convention*".

Dr Steele began by saying that the principles of universal access are embedded in the Metre Convention as highlighted by the 1799 statement "*à tous les temps, à tous les peuples*" (for all peoples, for all time). The preamble of the Metre Convention embodies the principle of universal participation: "[…] *the High Contracting Parties desiring to ensure the international unification and the perfection of the Metric System* […]" and over many years, CGPM Resolutions and CIPM actions have facilitated or encouraged universal participation. In addition, CGPM Resolution 1 (2018) "*On the revision of the International System of Units (SI)*" was a fundamental scientific and ideological change: in principle, all States now have access to the realizations of the units and this should encourage universal participation in what is now universally accessible.

Efforts to grow participation have been successful, particularly since the launch of the CIPM MRA in 1999. At the beginning of the 21st century there were 48 Member States; as of November 2022 there are 64 Member States representing 93 % of world GDP and 36 Associate States and Economies representing 4.7 % of world GDP. There are however other countries that are involved in international metrology that are not represented States. Dr Steele recalled that ten countries that supported the request to have World Metrology Day recognized by UNESCO were neither Member States or Associates, indicating that there is clear interest in having better accessibility. There are 83 UN Member States that do not participate, representing 2.3 % of world GDP. Adding these extra States would contribute little to the BIPM financially, but equally their inclusion could cost very little. The aim now is to be more inclusive, recalling that privileges and obligations must be balanced in an equitable system and many IOs have members with tiered payments and rights.

Dr Samuel congratulated the CIPM in formulating Draft Resolution F. The context provided by the draft resolution identifies the broad aim to facilitate inclusion of all States in the international system, albeit on the basis of in-depth exploration of what is best suited for their circumstances and requirements. Participation in the international system enables the growth of national measurement capabilities to support governments in, among other things: building technologically skilled workforces; ensuring fit-for-purpose measurement capabilities; enabling effective participation in global trade; addressing societal needs; protecting consumers and underpinning quality of life; developing expertise to solve emerging challenges; and leveraging opportunities through advances in

science and technology.

Effective engagement in the international measurement framework and broader quality infrastructure can help address the essential needs of countries and economies with emerging metrology systems as they work towards achieving the 2030 UN SDGs. This engagement brings with it access to the existing strategic partnerships established by the BIPM with key global bodies. As well as the benefits to those states currently not a part of the international measurement system, in terms of universal adherence to the Metre Convention, stronger engagement by states in the international metrology community benefits everyone. Fostering inclusion of diverse perspectives, and thereby increasing the opportunities for innovative contributions, is an invaluable strength in ensuring the ongoing effectiveness and relevance of the international measurement system. Dr Samuel completed her part of the presentation by saying that the health of a system can be measured by its ability to learn from, adapt to, listen to and empower diverse voices.

Dr Steele said that the CGPM is not being asked to vote on Draft Resolution F so that it can proceed immediately. The CGPM is being asked to give the CIPM a mandate to review membership practices of other international organizations and to examine the current application of Article III of the Metre Convention and how this Article might be adapted to allow broader inclusion. He stressed that there is no intention change the Metre Convention. The aim is to examine how the existing text can be used to achieve a broader goal. The implications of wider participation on the work programme and services of the BIPM will then be considered. The CIPM will be invited to propose appropriate actions at the 28th meeting of the CGPM on how to collectively proceed in order to include the entire world in the Metre Convention.

The President thanked Dr Steele and Dr Samuel and asked for comments and questions.

Dr Chambon (France) commented that Draft Resolution F is in the spirit of the Metre Convention and it is essential to have wide participation in such a scientific treaty. Draft Resolution F is a very good initiative and including other countries is important to ensure the SI is disseminated as widely as possible.

Dr Louw commented that he is from a developing country and the issue of universal adherence is of great interest in Africa. Within AFRIMETS, 34 of the member countries are from the 83 UN Member States that do not participate in the BIPM activities. Dr Louw added his thanks to Dr Samuel and Dr Steele. Dr Steele acknowledged the enthusiasm and commitment of Mr Henson in the preparation of Draft Resolution F.

Fourth session – 17 November 2022 (morning)

The President of the CGPM welcomed the delegates to the fourth session.

28. Report from the President of the CCL

Dr Ismael Castelazo, President of the Consultative Committee for Length (*Comité consultatif des longueurs*, CCL) presented the activities of the CCL since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCL Executive summary

The CCL is concerned with matters related to the definition and realization of the metre, practical length and angle measurement, and coordinate metrology. The CCL also provides advice to the CIPM in the field of length metrology. In addition, the CCL is responsible for implementation of length-related aspects of the CIPM Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA), through which NMIs recognize each other's measurements. The CCL maintains a portfolio of Key Comparisons (KCs) that have been optimized to cover the full range of possible CMCs. To achieve this scope the CCL Working Group on the CIPM MRA (CCL-WG-MRA) has worked on an extensive set of guidance documents, comparison protocols and report templates that are freely-accessible. The CCL Working Group on Dimensional Nanometrology (CCL-WG-N) has been proactive in comparisons that are intended to support this area, with several KCs having been performed and others that are ongoing. Length has a significant impact on most human activities today; the CCL maintains a watching brief to ensure that the needs of society, research and industry are satisfied, by forming links with relevant bodies and user communities. The future direction for the CCL concerns new areas such as 3D nanometrology, support for industry's move to non-contact surface scanning (healthcare and energy sectors), extending 3D metrology traceability to larger ranges (aerospace, precision civil engineering), compensating for thermal and refractive index effects at different scales, and issues of traceability at the nanometre and sub-nanometre scales (advanced science). A move towards metrology embedded in the manufacturing process represents a paradigm shift away from the traditional role of the calibration laboratory. The CCL is strongly engaged in the digitalization transformation project, working in collaboration with the BIPM to support NMIs' efforts to develop digital calibration certificates, with traceability to the *mise en pratique* (MeP) for the realization of the metre and the second (Recommended values of standard frequencies). These, and other new needs, will extend the workload of the CCL and its members over the coming years.

Scope of the CCL

Present activities of the CCL concern practical length and angle measurement (from one dimension to three dimensions, from sub-nanometre to tens or hundreds of metres) and future optical frequency standards (for metre realizations). This scope may be considered to include related issues such as nano-scale surface science, thermal properties of artefacts and instruments, refractive index compensation for optical beam propagation, laser physics, optics, instrumentation, interferometry, mechanical design, and mathematical software/data processing and advanced modelling. As such, there is some overlap between the work of the CCL and eleven of the fifteen Technical Work Areas of VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) and closer interactions with VAMAS are foreseen.

Strategy

To provide the highest level of efficiency, the CCL is supported by four Working Groups (WGs): the Working Group on Strategic Planning (CCL-WG-S) oversees the revision of the CCL strategy and associated documents on a regular basis; it collects and makes available information giving evidence for the continuing importance of metrology in length. The Working Group on Dimensional Nanometrology (CCL-WG-N) is seeking to harmonize traceability routes, terminology and reference standards for users in the area of nano-science. The Working Group on the CIPM MRA (CCL-WG-MRA) ensures the coordination of CCL and regional metrology organization (RMO) key and supplementary comparisons; maintains links with the RMOs, seeking to ensure the involvement of member laboratories of the CCL in major comparisons in the field of length, thereby providing the means for assuring world-wide traceability and equivalence of length measurements at the highest levels of accuracy; and facilitates the inter-regional CMC review process. Through the joint CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (WGFS), the CCL coordinates work on new realizations of the metre as optical frequency standards. The CCL has also set up a number of technical Discussion Groups, with membership beyond that of the CCL, where experts discuss new standards and KC-related issues, recent scientific advances, and highlights of ongoing research activities within and across the regions, in order to maximize benefits and support cooperative research.

A new Task group (CCL-TG-DIG) has been created to discuss the format of laser frequency data for submission to the CCL-CCTF-WGFS, taking into account the needs of the digitalized SI metre initiative.

The CCL strategy has been reviewed to assure consideration of the present and future needs in length metrology. The findings of the strategy document were condensed into two overall requirements for the future strategy:

- to anticipate future needs for instrumentation, standardization and traceability in emerging areas of science and industry, encompassing a wide variety of length scales under a range of measurement conditions; and
- to maintain maximum efficiency of the CIPM MRA processes thereby reducing costs to metrology institutes in all regions, whilst supporting mutual recognition.

Future science objectives

Dimensional measurements, traceable to the SI metre, underpin all world-wide manufacturing, assembly and construction from nanometre scales (nano-science), through macro-scales (automotive industry, healthcare, precision engineering), to decametre (and larger) scales (aerospace industry, ship-building, surveying). Organizations that undertake significant international trade are especially sensitive to traceability, particularly when multinational sourcing of components and assemblies is prevalent. Although classical dimensional metrology is a mature and well-established field, and the recent SI revision has minimal impact on the CCL, demands from external customers as well as the Grand Challenges (for example quality of life, energy needs, health, and environment) are setting the research agenda for CCL members.

1. Continue to improve and develop access to realizations of the metre

New traceability routes to the metre are to be investigated at the nanometre and sub-nanometre scales (where wavelengths of optical frequency standards are ‘too big’) in addition to ongoing research on realizations of the metre via updates to the list of frequencies. These will provide improved accuracy and traceability to dimensional nanometrology enabling reduced dependence on ‘vertical’ processes in the nano-industry.

The CCL-WG-N has explored new routes for traceability of length measurements at the nanometre and sub-nanometre scale. At the 2016 meeting of the CCL-WG-N it became clear that the lattice parameter of silicon had the potential of a new traceability route for TEM, AFM and displacement metrology. At the 2018

meeting at the BIPM Headquarters, cases for the three routes to traceability for length metrology via silicon lattice parameter quoted in CODATA were presented. For displacement generation and measurement, x-ray interferometry can be used. A series of silicon samples comprising stacked rings of atomically flat regions separated vertically by a distance corresponding to the silicon d111 lattice spacing (0.314 nm) have been produced and can be used as step-height standards for AFM or optical interference microscopes. For TEM, direct counting of atoms in a silicon pillar is possible. These proposals were submitted to the CCL and have been incorporated in the *Mise en Pratique* as secondary realizations of the metre.

2. Provide CCL support for new topic areas

The CCL-WG-N has been proactive in this area with the work on the silicon lattice parameter essential for the semiconductor industry. Other anticipated end-user benefits include improvements to biological compatibility of nano-scale devices (medicine). A series of pilot studies have been successfully concluded and renamed as CCL supplementary comparisons. Further pilot studies are planned (semiconductor standards) as well as ongoing advice and input to ISO standardization:

- Nano 6: measurement silicon lines, closing measurements in 2021 and report expected in late 2022 (pilot study only, not KCDB)
- Nano 1: a photomask comparison, the technical protocol has been prepared by PTB and the comparison is planned to start in late 2022 (depending on success of wafer, cutting under investigation)
- APMP.L-S5: nanoparticles comparison published in the KCDB, comparison piloted by CMS/ITRI and NMIJ involving seven measurement methods on five samples (one nano gold, one nano silver, three polystyrene latex)
- EURAMET 1239: measurement of surface roughness by AFM: circulation complete, analysis under way
- EURAMET 1242: measurement of areal roughness parameters: circulation completed and report under way
- EURAMET 1490: high precision flatness over 300 mm: circulation under way, Draft A report expected in 2023
- TEM comparison on silicon step: initial discussions for a possible comparison
- AFM measurements on silicon steps: initial discussions for a possible comparison.

Discussion Group 6 on coordinate metrology tackled the issues of CMCs based on popular flexible machines such as coordinate measuring machines (CMMs) and the preference of industry for non-contact, optical-based measurement *in situ* (lack of traceability, decreased accuracy relative to contacting techniques, but faster and hence preferred by users). This topic will benefit users in energy production (connectors used in oil and gas pipelines, gears used in wind turbines, plasma containment panels in fusion reactors) as well as health (validation of X ray Computed Tomography, advanced prosthetics).

Long-range metrology/geodesy is an established research area for many NMIs but a relatively new topic for some. However, this metrology area is gaining importance (for example aerospace, geodetics and surveying, GPS location verification, civil engineering, large science projects such as the large Hadron Collider (LHC) successor, large optical telescopes). Initial beneficiaries are companies that manufacture large products (for example aircraft, civil nuclear) where metrology-enhanced automation and *in situ* metrology will reduce manufacturing cycle times and reduce costs on long lead-time, expensive components.

3. Future CIPM MRA objectives

To minimize the cost of setting up the CIPM MRA processes within the CCL and to pre-empt ongoing support issues, the majority of the CCL's work in recent years has been concerned with efficient implementation of the CIPM MRA. In particular the CCL has implemented, via the CCL-WG-MRA,

several strategies to minimize the workload of CCL member laboratories associated with the CIPM MRA, whilst providing sufficient evidence to support CMCs. Since the outset, the CCL has foreseen the time and resource impact the CIPM MRA would have on its members and has strived to minimize the disruption and costs of the initial implementation and ongoing support for the CIPM MRA. This ongoing work targets three issues; minimizing the workload for comparison pilots; minimizing the portfolio of key comparisons; and reducing the burden on CCL member laboratories. The number of possible forms and dimensions of practical interest is virtually infinite, resulting in a wide variety of dimensional instruments and standards available on the market, and not all of them are possibly undergoing CIPM MRA coverage. The CCL maximized the breadth of support for CMCs by comparison evidence by undertaking a comparison review based on a skill matrix and giving clear guidance to accreditation bodies on the minimum necessary set of comparisons, thus reducing the number of comparisons and increasing confidence in their support for CMCs. The CCL-WG-MRA has prepared an extensive set of guidance documents, comparison protocols, report templates and evaluation spreadsheets, which can be used by pilots of key and supplementary comparisons. These freely-accessible documents are in addition to the publicly accessible copies of almost all CCL and RMO comparison protocol documents. The benefits have been to: spread the workload; reduce staff time per comparison; speed up the comparison process; and obtain clear validation of CMCs from comparison results.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities and achievements

Since the previous General Conference, the CCL has met once (3-year cycle) and its working groups have each met three or four times. The Discussion Groups have continued to be active outside of the normal meeting schedule and reported to the CCL meetings; topics included not only comparison planning but recent technical advances, contributions to standards and ideas for potential collaborative research.

In terms of the CIPM MRA, the recommendations made by the CCL-WG-MRA revision were analysed and the following actions were made. The CCL-WG-MRA has prepared an extensive set of guidance documents and reporting templates for use by future comparison pilots in order to reduce the workload and cost, thereby attracting new offers to pilot comparisons. Within EURAMET, several non-CCL members have started to use these templates and documents and at least one new key comparison pilot has come forward.

The CCL-WG-MRA Sub-Group on CMCs and the DimVIM (sWG-CMC) has refreshed the ‘DimVIM’ (CMC categorization list) and taken over responsibility for its maintenance. The list is used outside the NMI community by regulators and other service portals as it presents harmonized terminology for dimensional metrology in 14 languages (English, Chinese, Czech, Finnish, French, German, Greek, Italian, Japanese, Korean, Portuguese, Spanish, Thai and Turkish).

Length CMCs registered in the KCDB as numerical equations are migrating to quantity equations as approved by the CIPM; about 850 CMCs are concerned.

The CCL updated the *mise en pratique* document for the metre to include the Si lattice as a secondary representation of the metre, as suggested by the WG-N. The three existing methods of realizing the metre included in the document are time-of-flight of light radiation, laser interferometry (primary) and the Si lattice parameter (secondary).

The CCL-CCTF-WGFS worked and approved the Guideline on the “CMCs on frequency stabilized lasers” and the technical protocol of the KC CCL-K11.

A survey has been conducted to deal with the SI digitalized metre project and a Task Group has been constituted (CCL-TG-DIG) to collect and organize the data. A collaboration with the BIPM is under

way to achieve the “digitalized SI metre”, which will allow users to obtain in real time the latest CIPM-approved values of frequency standards and other length-related parameters, and a *Metrologia* paper has been published on this topic.

The CCL-WG-MRA approved the guideline on the List of Good Practice guides and similar sources of information in length metrology and on the revision to the coding scheme used for numbering comparisons undertaken in the CIPM MRA.

The CCL worked on the publication of the *Metrologia* Focus Issue on Length Metrology, which is being finalized: 16 papers have been published and numbers of downloads and citations are very encouraging.

In the period since the 26th meeting of the CGPM (2018) the list of optical frequency standards used for the realization of the definition of the metre and the secondary representations of the second has been updated by the CCL-WGFS and adopted by the CIPM after approval by the CCTF. A liaison between the CCL and ISO/TC 213 (Geometrical Product Specification) has been formalized.

Staff from CCL member laboratories and members of CCL Working Groups participate in Macroscale (www.macroscale.org) and Nanoscale (www.nanoscale.de) conferences and national and international standardization committees. The majority of participations are via the ISO GPS (Geometrical Product Specification) matrix of standards. Key international committees with CCL representation include: ISO/TC 213 (Dimensional and geometrical product specifications and verification), ISO/TC 60 (Gears), ISO/TC 1 (Screw threads), ISO/TC 201 (SC9) (AFM probe calibration), ISO/TC 202 (Microbeam analysis), ISO/TC 229 (Nanotechnology), IEC/TC 113 (Nanotechnology) and API SC7 (Gauging resources for gauges used in the oil and gas industries).

NIS (Egypt) became a Member, INTI (Argentina), NIMT (Thailand) and NSC IM (Ukraine) became Observers of the CCL in 2021.

Challenges and difficulties

An ongoing challenge is to extend the SI to smaller scales and larger scales whilst continuing to support existing capabilities. The CCL has already prioritized the nano-scale regime by setting up the WG-N. A new style of inter-RMO comparison, which is similar to a ‘virtual CCL comparison’, but with a reduced planning and participation workload (especially for CCL members), has been developed and presented to the CIPM. The second cycle of key comparisons is now being planned as a mixture of ‘classical’ and ‘inter-RMO’ styles. Linking of comparison results from one comparison to another, especially when the artefact sizes and properties are different across the comparisons, is proving difficult and it is not clear if end users of the CIPM MRA actually need this to be performed when making judgements regarding CMCs. In addition, some dimensional comparisons generate large sets of data and representing the results in the BIPM key comparison database (KCDB), especially in graphical format, is difficult. A linescale comparison (on a reduced set of measurands) generated 960 results for a single artefact. Calculation of over 921 000 pairwise degrees of equivalence is not practical or useful. Better metrics are needed to summarize large comparison datasets, to allow meaningful comparison of CMC claims and to display them in the KCDB.

Industrial use of coordinate measuring systems (CMSs) is increasing, despite unclear traceability routes and issues regarding CMCs for these services - this is a topic under active debate in the CCL Discussion Group on coordinate metrology (CCL-DG6). CMSs are used extensively throughout industry and can measure a large selection of items, many of which are also used in key comparisons. A way has been found to express CMCs based on CMMs that does not conflict with existing CMCs in the KCDB, enabling wider applicability of the CIPM MRA. Similarly, there is a need for traceability in software used in dimensional metrology and some CCL members are seeking CMC categories in this field to

satisfy customer requirements. However, undertaking this within the scope of the CIPM MRA is a challenge, possibly requiring inter-disciplinary discussions with other Consultative Committees.

Outlook in the short and long term

In the short term, work in the Discussion Groups will continue towards the next cycle of key comparisons. Further development of standards in nanometrology and instigation of further pilot studies, potentially in cross-discipline topics (for example nanoparticles are not simply a dimensional topic) will be a topic on the agenda of future WG-N meetings. Initiation of activities at some CCL member laboratories into X-ray Computed Tomography (XCT) as a dimensional metrology tool will trigger new studies that could lead to new CMCs and the necessary support for them. Coordinated assistance for NMIs in explaining the new SI definitions to end users may be required. Development of some services in long-range metrology will occur and some member laboratories and the CCL will need to address the needs for verification of these services. There will also be a challenge of maintaining momentum on the CIPM MRA as the CCL starts the third cycle of key comparisons (gauge blocks (K1) for example CCL-K1 1998-9, CCL-K1.2011 (2011), CCL-K1.n01 (2022-)), whilst new techniques and research will demand reallocation of resources. For several member laboratories, the issue of reinstating CMCs in areas where there is no longer a CCL key comparison (where a comparison topic has been abrogated) will need to be addressed. The transition to digital calibration certificates as a replacement for traditional paper/document-based ones is expected, and this will require assistance from the CCL, in accordance with general guidelines common to all CCs.

In the longer term, it is likely that there will be a replacement of some classical services and a change of the Discussion Groups' emphasis; this will be coupled to the challenge of setting up a new range of topics for key comparisons and new rounds of CMC submission in future topics (for example XCT services). There will be a requirement for more support for *in situ* services for customers (calibrations outside laboratory environments) and the ensuing traceability issues.

CCL Data

CCL set up in 1997 (CCDM from 1952-1997)

President:	I. Castelazo
Executive secretary:	G. Panfilo
Membership:	25 members and six observers
List of CCL members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccl/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	25-27 October 2021
Full reports of the CCL meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccl/publications
Five Working/Task Groups:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccl

- Digitalization (CCL-TG-DIG)
- Strategic Planning (CCL-WG-S)
- Dimensional Nanometrology (CCL-WG-N)
- CCL-CCTF Frequency Standards (WGFS)
- CIPM MRA (CCL-WG-MRA)
  - Sub-group on key comparisons (SWG-KC)
  - Sub-group on CMCs and the DimVIM (SWG-CMC)
  - Task Group on KC linking (TG-L)

Nine Discussion Groups: https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccl

CCL Comparison activity	Completed	In progress	Planned [2022-2023]
CCL key comparisons (and supplementary comparisons)	8 key 4 supplementary	3 key (1 runs continuously)	1
BIPM comparisons	2	0	0
CC pilot studies	0	0	1 [2017]
CMCs	1723 CMCs in 51 service categories registered in the KCDB		

The President thanked Dr Castelazo and opened the floor for questions and comments.

Dr Milton recalled that Dr Castelazo had talked about the interest and the new applications triggered by the secondary realization of the metre through the silicon lattice spacing. He asked if during the CCL's discussions, had there been any proposals for similar secondary realizations that would be particularly targeted on applications in particular sectors.

Mr Castelazo replied that at this point, he was not aware of any organized effort to propose a novel realization. This is the first realization in many years and it was necessary, mainly because the primary realization of the metre is at 633 nanometres, and that is extremely large for applications at a few nanometres. The CCL was fortunate that the reciprocal lattice parameter was measured very accurately for the Avogadro project. There has not been a problem in going up in scale in terms of uncertainty; the problem was with going down the scale and this innovation should satisfy the needs.

29. Regulation and quality infrastructure: addressing the challenges of two worlds apart

Dr Marianna Karttunen, Policy Analyst, OECD Regulatory Policy Division, Public Governance Directorate, said that the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Regulatory Policy Division serves the Regulatory Policy Committee, which is part of the Public Governance Directorate of the OECD. The Directorate deals with all matters relating to the quality of public institutions, public bodies and the processes that public bodies use to develop rules and regulations. The OECD has a Trade Policy Committee and a Trade Policy Directorate that handles everything to do with policies, standards and regulations that may have an impact on trade.

The OECD Regulatory Policy Committee has three basic tools, or normative documents, which set the basis for all of its work. The first is the "OECD Recommendation on Regulatory Policy and Governance", which was adopted in 2012. This recommendation set the quality disciplines for good regulation. It recommends that countries use evidence-based disciplines, for example regulatory impact assessments, to measure the costs and benefits of regulations that are adopted. It recommends that policymakers and regulators consult with stakeholders when developing regulations and gives guidance on how to do so. In addition, it recommends how to cooperate internationally so that regulations are not barriers to creativity and that there is coherence between regulatory frameworks, which is the most challenging aspect of this recommendation. The "OECD Recommendation for Agile Regulatory Governance to Harness Innovation" was adopted in 2021. It recommends how regulators have to adapt their practices in the context of rapidly evolving new technologies, when the traditional regulatory

processes may not be adapted to the pace and the scope of new technologies, which are often transboundary and cut across policy sectors. The "OECD Recommendation on International Regulatory Co-operation to Tackle Global Challenges" was adopted in 2022. It recommends what countries and regulators can do to work with regulators in other countries, so that there is coherence globally in terms of trade and when there are any kinds of exchange across borders.

Dr Karttunen presented the OECD approach to regulatory policy via five steps: roadmap; design; enforce; monitor; and evaluate. The first stage is to gather and rely on international knowledge and expertise. Existing international instruments should be considered when developing regulations and the rationale for departing from them should be documented. The impact beyond borders should be assessed, followed by active engagement with foreign stakeholders. A key principle driving the review process in *ex-post* evaluation and stock reviews should be to embed consistency with international instruments. The final step is to assess *ex-ante* the cooperation needs to ensure appropriate enforcement and to streamline "recognisable" procedures. She said that *ex-post* evaluation, which is a very important aspect of regulation, is one of the rarest practices implemented by most countries; in the standards world, the opposite is true and regular *ex-post* evaluations are a common practice. This provides an example of how the two worlds of regulation and standards are apart.

The Regulatory Policy Committee has a growing interest in standards and private standards and there are three reasons why the OECD considers the topic to be important. The first is that by looking at regulations and standards in parallel, in principle, both have an impact. The legal systems and even the WTO system on technical barriers to trade were conceived to consider standards as voluntary and regulations as mandatory. Therefore, standards are having less of an impact. However, standards, even though non-binding, may have a very important role and a very important impact, including an economic impact. They may be widely used, and possibly even more widely used than certain regulations. This dichotomy suggests that there is a difference between the legal systems and the reality.

The governance of regulations versus standards development is also very different. Regulations are developed, usually, by public authorities, for example regulators, policymakers and parliaments. Standards can be developed in different ways: in certain countries there is a single standardization body, in other countries there are multiple standardization bodies, in certain countries these bodies are public and in other countries they are private. In addition, there are both domestic and international standardization bodies that carry out important activities.

Public regulations have domestic safeguards, the checks and balances that are associated with all activities of public regulation and of any public activities. They follow the good regulatory practices that the Regulatory Policy Committee recommends. For standards, the system is more decentralized. For example, the WTO Technical Barriers to Trade (TBT) Committee recommends a certain number of principles on transparency, consensus, different principles of quality, and standard setting, at a relatively high-level, and the scope is still relatively uncertain.

Dr Karttunen commented that the question is to what extent these two worlds, although having similar impacts, are considered to have the same safeguards or the same quality disciplines. She said that behind the scenes of standards there is a whole world of "national quality infrastructure" that the regulatory world knows very little about; this represents a problem in itself. National quality infrastructure is the framework of institutions, legislation, rules, processes and practices that are used to verify conformity to applicable rules, whether they are mandatory or voluntary. The national quality infrastructure is essential to ensure safety, facilitate trade and to strengthen trust in transactions. It is very difficult for a trader to demonstrate that a product is viable if it has not demonstrated compliance through a conformity assessment procedure, for example testing, certification and inspections. Practices such as accreditation, metrology, testing and certification and market surveillance are

unfamiliar to the regulatory world. This is a significant problem because regulators develop technical regulations, which are mandatory: regulations may be developed without necessarily considering this entire quality infrastructure.

The OECD Regulatory Policy Committee recognizes that inadequate standards and quality infrastructure lead to barriers to trade, investment, and growth and technology. On the other hand, well-functioning standards and quality infrastructure support market building, trading integration and increases in added value. The OECD has identified three areas of concern linked to regulators that do not consider quality infrastructure in their processes: barriers to trade (for example costly imports and exports), barriers to innovation and technology adoption (for example difficulties in launching and adopting processes); and constraints to competitiveness, investment and growth (for example higher costs to consumers without increasing safety).

Dr Karttunen summarized by saying that there are four main issues that have been identified as problematic from the regulatory and standards worlds being so separate: the problem of the quasi-regulatory impact of standards and technical specifications; the essential aspect of national quality infrastructure for regulation; the democratic concerns and the control and transparency that regulations have versus private standardization; and misalignment issues between standards and regulations, in general, because of the parallel procedures.

There are two policy communities; the trade policymakers and regulatory policymakers, which results in different language being used. In the trade world it is common to talk about good regulatory practices. The regulatory policy world uses terminology such as better regulation, smart regulation, regulatory improvements, etc. These appear to be minor differences, but even minor differences in vocabulary can have important impacts. It is clear from the OECD members' activities that there is little communication between the two worlds. Technical regulations have to be notified to the WTO TBT Committee and these regulations are usually notified by trade policy authorities. The trade policy authorities that notify the WTO are separate from and, are not necessarily even in communication with, those authorities who develop the regulations or those who oversee the process of rulemaking. The result is that there are potentially a significant number of regulations that have trade impacts that go unnoticed, but also, there is a division even in a mandatory discipline, such as that of the WTO.

Dr Karttunen gave a summary of the work being undertaken by the OECD Regulatory Policy Committee on regulatory policy and governance to help advance this area from various perspectives. The OECD has three areas of work that contribute to this thinking. The first is the work on regulatory policy and governance, which is the core task of the Committee, with the good regulatory practices. The OECD partnership of international organizations brings together 50 international organizations that are working on the process of international rulemaking and standards setting. This partnership works on the quality disciplines that, at the international level, are applied to ensure the evidence-based policies are used, that there is impact evaluation, that there is transparency and stakeholder consultation, that there is *ex-post* evaluation, and that there is coordination between international actors. In the world of quality infrastructure, this is a very important aspect because there are many organizations that work in the field, including at the international level. In addition, the national quality infrastructure is a network of several international organizations working in the area; coordination between the actors is a very important aspect. Finally, there is the work on regulatory delivery and enforcement, on how to ensure that the enforcement mechanisms that go with the regulations are adapted to the risk and to the content of the regulation itself, which is, in the case of conformity assessment, typically, a very important aspect to minimize the burden created by the conformity assessment procedures.

The OECD is looking into the synergies between quality disciplines on regulations and standards. It is documenting the variety of actors and processes that exist in the quality infrastructure world, in parallel to

what is already known of the regulatory world. The OECD is identifying the key disciplines, steps, and processes through which one or other elements may malfunction, how one world can learn from the other, and the work required towards more optimal regulatory outcomes. The OECD is looking at working towards initial recommendations on how to overcome the inefficiencies of these two distinct worlds.

The President thanked Dr Karttunen and invited questions.

Dr Sené (UK) said that the OECD undertakes economic assessments and from the presentation there seems to be value in carrying out such a study for either metrology or the wider international quality system. He asked if the OECD has any plans to do such a study.

Dr Karttunen replied that the OECD has done quite a lot of research on this topic and a study will start in early 2023.

Dr Härtig (Germany) asked if the OECD is considering a digital infrastructure policy and if it has a strategy in this area. He said that future plans for digital workflow will include elements such as digital conformity assessment certificates, cloud solutions, digital product paths and it will be necessary to harmonize the whole world because these systems do not stop at the border.

Dr Karttunen replied that the OECD has an entire workstream on new regulations for today, which means, regulation in the context of new technologies, in which the importance of using digital tools for regulation will be considered.

30. Applying the FAIR principles to the worlds of research and measurement

Dr Simon Hodson, Executive Director of CODATA, said that his presentation would give an introduction to CODATA, introduce the Findable, Accessible, Interoperable and Reusable (FAIR) principles and the relationship to open science, and the implications for science and measurement.

CODATA is the Committee on Data of the International Science Council (ISC). CODATA is a separate organization that was established by the International Science Council, in its previous incarnation as the International Council of Scientific Unions. CODATA supports the ISC's mission of 'advancing science as a global public good' with a specific remit of issues around data. Its role has developed to include the advancement of the FAIR principles and ideas of Open Science, in the context of science globally. CODATA works through task groups and working groups and it has an international membership, including the International Scientific Unions, which provides representation from particular areas of research.

CODATA has four priority areas for its activities: Decadal Programme - Making Data Work for Cross Domain Grand Challenges; Data Policies (either directly through its International Data Policy Committee and their activities, or by contributing expertise to other initiatives); Data Science; and Data Skills. Dr Hodson commented that he was the chair of the expert advisory group that developed the European Commission's report, "Turning FAIR into Reality" [19], which looked at how to implement the FAIR principles in European science, and he co-chaired the expert advisory group for the UNESCO recommendation on open science. CODATA undertook a study with OECD, which synthesized a considerable amount of research on the economic impact of data infrastructures. It examined funding streams, business models and the value proposition of data infrastructures. In addition, CODATA

[19] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Turning FAIR into reality : final report and action plan from the European Commission expert group on FAIR data, Publications Office, 2018, https://data.europa.eu/doi/10.2777/1524

operates a programme of short, intensive courses on data skills for researchers and for data stewards; the people in institutions that are responsible for data.

Dr Hodson said that an underlying principle in science policy and practice is that data, and other outputs of research, for example code and services, should be FAIR. There is confusion about the relationship between FAIR and Open. It is useful to underline that although FAIR is often talked about in the context of Open Science, and although in the UNESCO recommendation CODATA insisted that FAIR was a necessary component of Open Science, FAIR itself does not necessarily mean open. The drivers for Open and Open Science are reproducibility, transparency, and public benefit and there is much evidence to support this. Research data should be as Open as possible and only as closed as necessary; the default option is Open. The drivers of FAIR are to maximize the utility and usability of data, as well as the transparency and quality. This does not necessarily apply to datasets, which do not have to be open. FAIR applies as much to data that must be restricted as to data that can be Open. In addition, it is necessary to apply principles of good data stewardship and how to get greater value from data: good data stewardship practices allow data to be used more effectively.

Dr Hodson said that over the last 10 to 15 years there has been a drive for Open Science and, since 2016, for open data. One of the key drivers in support of the case for Open Science is that "Good scientific practices depend on communicating the evidence". In 2012, a Royal Society report, which was chaired by Geoffrey Boulton, a previous President of CODATA, argued that "to fail to communicate the data that supports scientific assertions is tantamount to malpractice". An editorial in *Molecular Brain*, "No raw data, no science: another possible source of the reproducibility crisis"[20] highlights the concerns raised in particular scientific communities about the failure immediately to communicate data and is an interesting expression of the concerns of one particular editor in chief, about a failure to submit data at the time of the submission of the article. A second driver is "Societal and scientific benefit: essential for addressing global and societal challenges". International organizations, for example the OECD and UNESCO, as well as the European Commission, have been developing policy instruments to support open science. There are certain flagship research areas, for example genomics, astronomy, and crystallography, which are very good at making data available for their communities and are often cited as examples of good practice. FAIR is related, but the emphasis is on data stewardship and the utility provided by increased usability of data. The FAIR principles put emphasis upon machine accessibility and actionability of the data.

In contemporary science there is a need to run code over large heterogenous datasets from a number of different sources. These tools, and even more in-depth analysis, do not work unless there is sufficient annotation and description of the data, and unless FAIR principles are implemented. The European Commission commissioned a report from PwC in 2019, which estimated the opportunity cost for the European research area of not having FAIR data at 8.2 billion euros. Research and interviews with researchers made a rough estimate of 80 % of project effort going into data collating and data cleaning. One of the arguments in favour of FAIR data is that it is far more efficient to put effort in curating and stewarding the data, rather than leaving it to downstream research groups that have to carry out data collating and data cleaning.

Dr Hodson presented the FAIR Guiding Principles and the metadata required. To be findable the data must have sufficiently rich metadata and a unique and persistent identifier to enable discovery. To be accessible data must be retrievable by humans and machines through a standard protocol using authentication and authorization where necessary. For interoperability, metadata must use a 'formal, accessible, shared, and broadly applicable language for knowledge representation'. To be reusable the metadata must provide rich and accurate information with clear usage license and a detailed

[20] Miyakawa, T. No raw data, no science: another possible source of the reproducibility crisis. *Mol Brain* **13**, 24 (2020). https://doi.org/10.1186/s13041-020-0552-2

provenance. The "Turning FAIR into reality" report created a roadmap and a framework for the implementation of the FAIR principles in the European research area. There are a number of key messages in the FAIR principles. Machine accessibility does not just mean that it is possible to download the dataset; it should mean that there is programmatic access. Interoperability is challenging but there should be a description of variables or quantities so that they can be referenced, by code, and used in processing of data. In terms of reusability, it is known what can be done to the data.

Dr Hodson mentioned the concept of FAIR Digital Objects. He said that there are a number of interpretations of what this could and should mean. The most persuasive is the concept of a machine-actionable unit of information, for example a dataset, a datum, an image, or a research or science result, that needs to be communicated, with all the necessary information for humans and their machines to act upon. A considerable amount of metadata can be included and the FAIR principles imply that all the information is needed. As well as the identifier, the data and the semantics, there is also a need for structural metadata (the structure of the dataset or what is being accessed, as well as the provenance). This can be described as (meta)metadata, or what metadata rules and languages are being used for the metadata. This gives a chain of information required for data to be processed. He said that this is challenging and there is a lot of work to be done. However, it is known what needs to be done to implement the FAIR principles and to make scientific data more machine actionable.

Dr Hodson said that CODATA is a signatory to the "Joint Statement of Intent on the digital transformation in the international scientific and quality infrastructure" along with the BIPM, the International Science Council, and a number of other standards and metrology organizations. The document evolved out of an on-line conference entitled The International System of Units (SI) in FAIR digital data, which was held on 22-26 February 2021. From a CODATA perspective the most interesting point in the joint statement is "Maintaining confidence in the accuracy and global comparability of measurement will require the creation and adoption of a fully digital representation of the SI, including robust, unambiguous and machine actionable digital representation units of measurement and of measurement results, and uncertainties." CODATA considers that this encapsulates the drivers behind FAIR in other areas of science.

Dr Hodson said that in terms of measurements and research there is a need for a digital and FAIR representation of units. There is cooperation with the BIPM on the CODATA Task Group for Digital Representation of Units of Measurement (DRUM). There is also a need for digital and FAIR representation of quantities; in some research areas they are referred to as the measurand, property or the variable in the social sciences. What has been observed and measured needs to be precisely defined so that it is possible to access the definition on the internet using the code. Therefore, it is known unambiguously, when processing and analysing a dataset, what it is that is being referred to. The FAIR terminologies and vocabularies are an important tool and are described in the paper on "Ten Simple Rules for Making Vocabulary FAIR".[21] He recalled some work being done in the social science area, which can be applied to other types of dataset. It includes the idea of a "variable cascade", which is a codified, explicit relationship between a definition of the concept "the conceptual variable" with the ways it is represented in code. There is also the way it is implemented in a given dataset. After the explicit associations have been made, processing and integration of different datasets becomes easier.

The DRUM Task Group has an overall mission to promote cooperation and coordination among a number of initiatives for the digital representation of units of measurement. It issued a manifesto, which highlights the importance of engagement with the community that is part of the International Science Council and in particular, the international scientific unions. The international scientific unions are important stakeholders and represent researchers in their given domains, along with other scholarly organizations

[21] Cox S.J.D., Gonzalez-Beltran A.N., Magagna B., Marinescu M.-C., Ten simple rules for making a vocabulary FAIR, *PLOS Computational Biology*, 2021, https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009041

and associations. This engagement is a tool that is used to elicit agreement about practices, in particular research areas, and the international scientific unions have had a long-term mission to develop nomenclatures and terminologies, which are an important contribution. The work of the DRUM Task Group is described in the paper "Stop squandering data: make units of measurement machine-readable".[22] The DRUM Task Group contributes to the CIPM Working Group on Data's work on a 'Universal Metrology Data Model' for Units of Measurement and is preparing publication of the CODATA Recommended Values of the Fundamental Constants as machine-readable Linked Open Data.

Dr Hodson finished by mentioning the WorldFAIR project, which is a two-year project to advance implementation of the FAIR principles in a range of disciplines, or cross-disciplinary research areas, starting on 1 June 2022. There are a range of projects which make a significant contribution to FAIR and to its implementation, conceptualization and what it means. CODATA is involved in the implementation and the digital transformation of international scientific and quality infrastructure.

The President thanked Dr Hodson and opened the floor for questions and comments.

Dr Milton thanked Dr Hodson and said that his presentation is a reminder of how much is going on in this field and how much there is to learn. Dr Hodson mentioned that the FAIR Digital Object has emerged as being a major issue. Dr Milton asked if there is a timeline in the near/medium term that should be followed, points along the way at which more might be known about the FAIR Digital Object and whether the metrology community should be reacting with the creation of its own data structures in response to the thinking that is emerging. Dr Hodson replied that the idea of a FAIR Digital Object has been under discussion for a few years in its basic, conceptual form as a machine actionable unit of information. The idea is for an object to which all the necessary metadata for processing is attached; that concept is well established and is discussed in the report 'Turning FAIR into Reality'. It is unlikely that there will be single specification or standard for it. There are some draft standards being considered, and there is an ongoing debate about how far-reaching the standards should be. So far, no specifications have been actively declared by the FAIR digital object forum, and they may choose not to. A number of working groups have been set up and over the next 12 months they will undertake more work on this issue. In late 2023 there may be a decision on a possible specification.

31. Report on liaison activities from the ISO

Ms Cristina Draghici, Director, Conformity assessment and consumer matters at the Central Secretariat of the International Organization for Standardization (ISO), said that the relationship between standards and measurements are well understood by everybody at the CGPM. The intertwined histories of ISO and the BIPM prove that this is the case: the relationship is very much alive. This relationship extends into areas of conformity assessment, trust, and building confidence, as confirmed by the joint declaration on metrology. ISO is a signatory to the "Joint Statement of Intent on the digital transformation in the international scientific and quality infrastructure". ISO indicated its support to the development, implementation and promotion of the SI digital framework by signing the document, as part of the wider transformation of international scientific and quality infrastructure.

Digitalization has not just disrupted the world of ideas, journalism and the media, it has changed the nature and the potential of the supply chain in a tangible way. Advances in 3D printing mean that sophisticated objects can be produced at home, when only a decade earlier they might have needed a

[22] Hanisch R., et al., Stop squandering data: make units of measurement machine-readable, *Nature* **605**, 222-224 (2022) https://doi.org/10.1038/d41586-022-01233-w

factory. Those objects can be distributed physically through an increased array of delivery options, that are underpinned by digital technology, that could include delivery by drone, or by a bicycle courier who is located through artificial intelligence, engaged, and paid digitally. Digitalization presents opportunities for a new kind of globalization, where entrepreneurs and innovators can access global markets with fewer barriers than before. With the potential to generate jobs in remote places and drive economies, such technology is also important in "just in time delivery" and maintenance of the supply chain in fast moving and volatile situations. These advances have the potential to include more people than ever before in global trade. There are however practical questions that remain to be answered.

The WTO strongly encourages members to base their measurements on international standards as a means to facilitate trade and create a predictable trading environment. There is a need to consider the implications, from a technical barrier to trade perspective, with the trade environment becoming progressively more digital. In addition, it is necessary to consider the role of standards and metrology in this digital world. There is a climate of distrust, complex network supply chains, an environment that encompasses physical objects, and, at the same time, objects that are themselves entirely digital. For example, digital twins, which accelerate testing and simulation that could be too costly and complex in the physical world.

Ms Draghici presented the ways in which this will directly impact the work of ISO, and, building on this, the ways in which the ongoing collaboration between ISO and the BIPM will be essential to building trust in the digital world. ISO has identified three main ways in which digitalization impacts the conformity assessment sector. In all cases, this is supported by digital metrology. Firstly, there is a move towards remote types of assessment; this was accelerated during the Covid-19 pandemic. There are advantages in terms of both efficiency and accuracy, although there remain many situations where in person intervention is needed. Secondly, there are assessment objects that are themselves digital. There are ongoing questions regarding the characteristics and features of a purely digital object and how it complies with requirements and protocols that allow it to function and interact in the intended ways. Thirdly, there is the question of how certificates themselves will be digitized; what will such certificates look like and how they will work. ISO is aware that there is a desire to advance in this area, with most members surveyed by ISO saying that they would prefer to go forward with a hybrid model. This would cover items related to remote auditing, the use of digital twins, the impact of machine readability, the "Digital SI" framework, and transferable and executable standards.

The ISO SMART project will continue for several years and has the potential to transform the way ISO develops standards and the way the standards are used. The project is developing standards that are machine readable and actionable, whilst maintaining the traditional way in which standards are produced. There is potential to expand in this area, but this will require collaboration between ISO and the BIPM, with full consideration of measurement and units and the necessity to "get it right the first time". SMART standards will make life easier, safer and better: by improving efficiency through reduced human intervention, hence easier; minimizing the risk of human error, hence safer; and broadening the relevance, applicability and uptake of standards, hence better. The ISO SMART project is currently in its second phase, where, through extensive consultation with its members, ISO is adapting the approach to fit the needs. At the beginning of 2023, ISO will move ahead with implementation. The consultative, iterative process will continue throughout the implementation phase, and ISO will continue to refine and adapt its approach. The technology touches on almost all areas of standardization, hence the necessity to continue working together with BIPM in the "Digital SI" framework.

Ms Draghici said that digital certificates are potentially straightforward, however there is a need to ensure traceability and trust in digital standards of conformity. For example, how can you avoid forgery or corruption that would undermine confidence. It is incumbent upon established players, like ISO and the BIPM, to bring stability to the process. It is necessary to identify ways that can address these

concerns to benefit from the full potential of such certificates, including their ability to be read by machines, and thus integrated into smart manufacturing.

Ms Draghici presented future plans for work in these areas. In 2023, ISO will hold a series of discussions on the theme of digital conformity assessment. The virtual sessions will bring together experts to address the three topics of digital objects of conformity assessment, digital measurement methodology, and digital statements and conformity. The ISO Committee on Conformity Assessment (CASCO) is working on the development of a standard, ISO 17012, on remote monitoring in response to the needs of the metrology community. The topic of sustainability is important to ISO, which is addressed in two pillars, firstly climate, with the London Declaration being the ISO commitment on climate action, and the second pillar being diversity and inclusiveness. ISO is setting up a coordination committee in the area of environmental, social and governance (ESG). It will coordinate the work with ISO and will work with its partners and other international organizations. ISO CASCO has a task force to look at how conformity assessment needs to adapt, or what can be done to support ESG.

Ms Draghici said that as the world moves forward with the digital transformation, there are two challenges: moving quickly and doing it right. The ISO process is one that involves wide groups of stakeholders, and advances are being made in areas like on-line collaborative offerings and developing standards using an on-line tool. The potential exists to manage the process in new and more efficient ways. The aim is to ensure that ISO and the BIPM continue to work closely together. The two organizations have a long history of working together and there are many synergies and overlaps between the two worlds. In a digital future, the collaboration between the BIPM and ISO will be more important than ever.

The President thanked Ms Draghici and invited questions.

Dr Härtig (Germany) asked about the digital conformity assessment format. According to ISO/IEC 17065, the definition is almost finished. It is difficult to launch because when the ISO standard was developed it did not mention digitalization. He asked if there is a strategy in ISO to enhance the digital process and to find a solution in addition to the existing standards. Ms Draghici replied that ISO is aware that the CASCO series of standards, the ISO/IEC series of standards, that underpin the conformity assessment system need to consider the new reality of the digital world. A taskforce was launched a few years ago to determine if the toolbox/series of standards is still usable. It investigated if there are any gaps and if it is necessary to change anything in view of adapting to SMART standards and digital conformity assessment procedures, digital conformity assessment objects, and digital certificates. ISO/IEC 17065 is up for systematic review in 2023 and that review will provide an opportunity to look into what is required. As there is a move towards using on-line standard auditing, there will be an associated move into more remote and asynchronous ways of working within the standards development processes. It is hoped that this will be accompanied by an acceleration of standards being revised, adapted, and new standards that are needed coming into use.

32. Report from the President of the CCU

Prof. Ullrich, President of the Consultative Committee for Units (*Comité consultatif des unités*, CCU) presented his report on the activities of the CCU since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCU Executive summary

The CCU is responsible for the further development and improvement of the International System of Units, the SI, and it provides advice to the CIPM about units of measurement in general. To fulfil this task, the CCU seeks advice from its member National Metrology Institutes (NMIs), its liaison organizations and other Consultative Committees. Until 2018, the work of the CCU was focused on the revision of the SI, which was approved by the CGPM in the same year and implemented in the following year. Since then, the strategy of the CCU has been reviewed and the committee now focuses on a number of topics related to the further improvement of the SI. In the short term these include the introduction of new prefixes for SI units and the clarification of the role of units for angles and so-called dimensionless quantities in the SI. In the longer term the planned redefinition of the second will become the dominating topic. The CCU follows the process of increasing digitalization in metrology and explores possible roles of the committee. The development of unambiguous definitions of core metrological terms is expected to become of crucial importance to support the increasing levels of machine-readability and machine-interpretability of metrological information.

Scope of the CCU

The work of the CCU is concerned with matters related to:

- the development and improvement of the International System of Units (SI),
- providing advice to the CIPM about units of measurement in general,
- providing information and advice on units and their use beyond the CIPM to a wide range of international bodies, associations, commissions and committees as well as individuals who approach the BIPM seeking such information.

To fulfil its tasks, the CCU seeks advice from its member NMIs and liaises with stakeholders: international associations, commissions and committees as well as intergovernmental organizations and international bodies. It stays in close collaboration with all related Consultative Committees (CCs) and NMIs. The CCU is responsible for the preparation of successive editions of the SI Brochure, including the “Concise Summary of the SI”. The SI Brochure is the most important and widely used publication of the BIPM. It is now in its 9th edition, which incorporates the revised definitions of the SI. Every care is taken when preparing the text, not only in the accuracy of the meaning but also because it is translated into many other languages as well as being used by people whose first language is neither French nor English. More recently, the CCU has taken steps to support the progress of digitalization in metrology, in particular by providing definitions of core metrological terms which are adequate for increasing levels of machine-readability and -interpretability.

Strategy

Until 2018, the strategy of the CCU was strongly focussed on the preparations for the revision of the SI, which was approved by the CGPM in 2018 and implemented on 20 May 2019. The main task of the CCU remains the further development and improvement of the SI. The CCU Strategy Document was updated in March 2022 and identifies a number of activities in this field: preparing the redefinition of the second (together with the CCTF), clarifying the status of units for angles and dimensionless quantities in the SI, extending the range of SI prefixes as required, clarifying the definitions of core metrological terms and reflecting on the need to maintain the distinction between base units and derived units. The CCU, and in particular its working group on strategy, carefully follow the process towards increasing levels of digitalization in metrology and possible roles therein of the CCU. For such topics, which cannot reasonably be handled by the full committee, the CCU creates dedicated working groups or task groups, which are dissolved after completion of their task. At present, the CCU has two working groups;

for strategy (WG-S) and for the definition of core metrological terms (WG-CMT). It has one task group, on the treatment of angles and dimensionless quantities in the SI Brochure (TG-ADQSIB). The Working Group on Strategy usually meets once a year and prepares the meetings of the full committee, which meets generally every second year.

Due to its cross-cutting nature, the CCU cooperates with many bodies, which have a direct interest and concern in its activities. Representatives of other Consultative Committees are invited as guests to CCU meetings. Relevant international scientific organizations and unions attend CCU meetings as liaison organizations. Although not being members of the CCU, the liaison organizations have in practice the same rights as members to present their opinion on matters of concern.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities and achievements

Following the introduction of the revised SI, the CCU arranged a survey among its members, liaison organizations and educational organizations to gather feedback on how the revision was introduced, on the communication strategy, on the implementation as well as on innovations triggered by the revised SI. A separate questionnaire was prepared for each of the three communities. The questionnaires were sent to the NMI Directors of all Member States and to the Presidents of all liaison organizations of the CCU. The NMI Directors were asked to pass on the questionnaire for educational organizations to representative institutions in their country. Replies were received from 18 NMIs, seven liaison organizations, 12 Universities and five schools. In summary, none of the NMIs reported significant difficulties in the implementation of the revised SI and there was no significant impact on the NMIs' customers. A number of innovative approaches were reported. All NMIs used the event to promote the importance of metrology. The liaison organizations were in general well informed of the changes and did not experience any major difficulties. Some of the Universities had already incorporated the revision into their curriculum, but others were not aware of the change.

At its 24th and 25th meetings the CCU discussed the necessity to expand the current range of SI prefixes from 10^{24} up to 10^{30} and from 10^{-24} down to 10^{-30}. Pressure for change was brought to bear on the SI by data science and the exponential growth of the global datasphere. Unofficial names for new prefixes were already suggested by this community and applied in the popular science media. A roadmap was developed with the objective of presenting a draft resolution to the 27th meeting of the CGPM in 2022. Draft Resolution C presents four new prefixes to cover the additional ranges.

The CCU has taken up again the long-standing question about the status of the radian and steradian in the SI, and the status of other so-called dimensionless quantities. At the CCU 24th meeting all members and liaison organizations of the CCU were asked to develop an institutional view on the status of units for angles and dimensionless quantities and to present it at the next meeting. The result was a majority leaning towards the status quo in defining units for angles as derived units, but there was also some support for the SI Brochure to be improved to prevent, as far as possible, misunderstanding and error. The CCU Task Group on angle and dimensionless quantities in the SI Brochure (TG-ADQSIB) was created with the objective to suggest clarifications of the text of the SI Brochure related to these topics. The task group has started its work and will make recommendations at the next meeting of the CCU. It was also decided to hold a joint CCU/CCQM workshop on quantities which are counted in early 2023, with participation from other Consultative Committees. The aim of the workshop is to trigger a discussion on counting across the metrological community so that a common understanding of counting within the SI is achieved.

As a consequence of the revision of the SI, which based the whole unit system on a set of seven defining constants, the question arose on the definitions of terms like "unit", "quantity" and "quantity value".

The CCU set up a new Working Group on Core Metrological Terms (WG-CMT), which should identify core metrological terms that enter CGPM Resolutions and national legislation, and which are therefore in the interest of Member States, and propose definitions for these terms, taking into account upcoming needs in digitalization. During several meetings the WG could not achieve a consensus and digitalization expertise was missing. Thus, it was decided the requirements concerning machine readability of these terms should be better taken into account. Additional experts with relevant background in digitalization, mathematics and linguistics have been invited to attend further meetings of the WG.

The CCU strategy document, which had been in force since February 2014, has been revised by the CCU Strategy Working Group to clarify the mission of the CCU once the revision of the SI was approved and implemented. One of the main tasks for the future is the monitoring of advances towards a future redefinition of the second. This work will be led by the CCTF and the stages of the process have been defined in a CCTF roadmap, which foresees at present a possible adoption of the redefinition of the second by the CGPM in 2030.

Challenges and difficulties

A major challenge will be to come to a metrologically and mathematically sound definition of core metrological terms such that machines are able to unambiguously “understand”, interpret and finally, even act on that basis. This is of decisive importance for the international quality infrastructure (QI) of the future that builds on these definitions. It is expected that this activity will be the foundation of a “digital VIM” (Vocabulary of Metrology) that by itself has huge practical implications in standardization, for example the ISO 80000 series, and as a result, for many metrological services in the future, such as “digital calibration certificates”.

An ongoing challenge is to come to an agreement on the status of the radian and steradian in the SI. This is a long-standing debate between two opposing views: should angle units remain derived units, or should the radian be given the status of an eighth base unit. If the latter alternative were to be chosen, this would lead to changes in many familiar equations. A third alternative consists in reviving the class of supplementary units, to which the angle units belonged until 1995, when this class was abrogated by a decision of the 20th meeting of the CGPM (1995). The International Mathematical Union (IMU) became an official liaison of the CCU in order to deepen the scientific discussion.

Outlook in the short and long term

Following the expected approval of the new SI prefixes at the 27th CGPM (2022), a new version of the 9th edition of the SI Brochure will be published, which will also include a number of editorial improvements. In the short term the work of the CCU will be focused on clarifying the status of units for angles and dimensionless quantities and on supporting digitalization in metrology by providing machine-readable and machine-interpretable definitions of core metrological terms.

In the longer term the focus will be on the planned redefinition of the second, which is being prepared by the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF). A roadmap has been developed by the CCTF to specify the timeline and the necessary milestones. The most likely scenario leads to a redefinition in 2030. The CCU will provide input into this process and will also review the impact of proposals for the redefinition of the second on other fields of metrology.

CCU Data

CCU set up in 1964

President:	J. Ullrich
Executive secretary:	M. Stock
Membership (since 2018):	Thirteen members, eleven liaisons, no observers
List of CCU members:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccu/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	8-9 October 2019, 21-23 September 2021
Full reports of the CCU meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccu/publications
Two Working Groups:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccu

- Core Metrological Terms (WG-CMT)
- Strategy (WG-S)

One Task Group:

- Angle and dimensionless quantities in the SI Brochure (TG-ADQSIB)

33. Introduction to Draft Resolution C "On the extension of the range of SI prefixes"

Prof. Richard Brown, Head of Metrology, NPL (UK) said that the International System of Units (SI) is an essential part of modern society. He commented that when people think about the SI, they often think about the SI base units and the SI-derived units. Since the revision to the SI in 2019, they might also think about the redefined constants. It is rare that anyone thinks about the SI in terms of the SI prefixes. However, the SI prefixes are an essential part of the SI, and moreover, they are probably the part of the SI that is best known to the general public, because of the prevalence of prefixes in everyday life and everyday weights and measures, such as kilograms, millilitres and kilowatt hours. In addition the prefixes have entered the common vocabulary for technical terms like nanotechnology, microscooter and gigafactory.

The complete set of SI units includes the multiples and sub-multiples formed using the SI prefixes. This is particularly important because it allows the use of SI units across a range of quantity sizes, if SI prefixes are employed. This is fundamental for the effective communication of measurement results across disciplines. By using the SI prefixes, it is possible to move seamlessly across the scale, from one nanometre, to one micrometre, one millimetre, one metre, and so on. In addition, the SI prefixes ensure that the numerical value of the quantity being expressed remains on the human scale, ideally between 1 and 100.

Prof. Brown said that this makes measurement results easier to comprehend and communicate. He used the amount fraction of sulphur hexafluoride in the atmosphere as an example. This can be expressed in three ways: a decimal notation, a scientific notation, and an SI prefix notation. The decimal notation is the hardest to comprehend due to the number of zeroes after the decimal point (0.000 000 000 011 mol/mol). The scientific notation is easier to comprehend (1.1×10^{-11} mol/mol), but the SI prefix notation (11 pmol/mol) is by far the easiest to comprehend. Just like the SI, the prefixes have always evolved in response to the needs of stakeholders. This has been for three main reasons: the first being to increase usage in communities where the current range is not sufficient for their purposes. The second is where progress in science and technology has required an expanded range. The third is to ensure that unofficial names that are in use or circulating do not become adopted *de facto*. In each of these three cases, the SI must respond, otherwise non-SI solutions will appear instead: this is exactly what the SI has done.

The SI prefixes have evolved over time. It was a short time after the signing of the meeting convention in 1875 that the initial set of prefixes were adopted. In 1935, the requirements of electrical science and electrical engineering were taken into account, and the range expanded again. In 1960 the SI was formalized and at the same time the opportunity was taken to incorporate drivers from the standardization community, and again expand the range. Since that time, the SI has responded to requirements in nuclear physics, precision of time, electromagnetic frequency, world energy usage and radioactivity. In 1991, it responded to the requirements of the chemistry community to provide SI units for expressing molecular quantities: that was 31 years ago. This is the longest period since the Metre Convention was signed between expansions to the range of SI prefixes. The current proposal is to respond to the requirements of data science, digitalization, and big science in general.

Prof. Brown said that the SI needs to respond to rapid increases in the size of data sets used in science and technology, and also the detail with which the universe can be studied. The SI is interested in data science because it is clear that the SI decimal prefixes are preferred in data science over the binary prefixes that are standardized in the IEC 80000-13 document. A study[23] of the prevalence of the SI decimal prefixes in the scientific literature from 1992 to 2017 found that the decimal prefixes are preferred in the literature by about two orders of magnitude in most cases. If the SI decimal prefixes are preferred in data science they are also preferred in everyday life.

The requirements of data science and digital storage in terms of computers and phones etc., in terms of decimal SI prefixes need to account for the annual increase in the size of the global data sphere. The current increase is exponential, and that acceleration is expected to become even faster, for example because of widespread digitalization, the advent of quantum computing, the internet of things, and 6G communications. By 2025, it is anticipated that the global data sphere will be around 175 zettabytes, and will keep increasing. It will soon reach yottabytes, which are at the top of the current scale of 10^{24}. The question arises as to what is bigger than a yottabyte. At the moment there are a number of unofficial names for 10^{27} and there is a clear danger of these names being adopted. Official SI prefixes must be provided instead. Equally, a symmetrical extension to sub-multiples is very useful and technical areas such as particle physics and astronomy would also benefit.

The proposal in Draft Resolution C is for the new prefixes to follow the recent precedent: there are two symbols for the prefixes, and those symbols become the first letter of the prefix name. Only R and Q remain available from the English alphabet for use for prefixes; these letters are not already used for other SI prefixes or units. The symbols always have capitals for multiple and lower case for sub-multiples. The names always use multiples ending in an A and sub-multiples ending in an O. The stem of the names are loosely based on the Greek for nine and the Greek and Latin for ten, following the recent precedent.

Putting this together gives the following: 10^{27}, ronna, capital R. For 10^{-27}, ronto, lowercase r. Quetta, capital Q, for 10^{30}, and quecto, lowercase q, for 10^{-30}. If adopted, that would give 24 prefixes, covering sixty orders of magnitude. Prof. Brown emphasized that this is a useful, timely, and low-risk addition to the SI: the SI prefixes promote effective and unified communication in science.

The President thanked Prof. Brown and asked if there were any questions or comments.

Dr Milton commented that the metrology community is concerned about the impact of what it does and one measure of impact is how much the press are interested in some activities. The two items on the agenda that have been of greatest interest to the press are the SI prefixes and the continuous timescale resolution. Using press interest as a measure of impact, this may be one of the highest-impact actions of the conference, should it be adopted. Dr Milton thanked Prof. Brown for bringing this forward and

[23] Brown R.J.C., On the nature of SI prefixes and the requirements for extending the available range, 2019, *Measurement*, **137**, 339-343, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.059

commented that the requirement for new prefixes is common to many communities. It was asked if any consideration had been given to the machine readability of upper- and lower-case characters for the symbols, because confusion between the two could result in big differences in results. Prof. Brown replied that it is not expected to be a problem, however there are other problems such as digital representation of the symbol for micro.

34. Introduction to Draft Resolution B "On the global digital transformation and the International System of Units"

Prof. Ullrich, in his capacity as Chair of the CIPM Task Group on the Digital SI (CIPM-TG-DSI), began by speculating on the Quality Infrastructure of the future. It is predicted that by 2050, 80 % of the world's population will live in cities (50 % now). This growth will require consideration of how the supply chain will work, what measurements and metrology will be needed, what quality infrastructure will be needed, and how to guarantee high quality and reliability in complex and interlinked systems, for example smart health, smart buildings, smart mobility, and smart factories. It is likely that these systems will be interconnected by 5G or 6G networks and will include elements such as energy grids, batteries, heating, water supply, cooling etc. He speculated that this interconnected system will probably be controlled by artificial intelligence.

These interlinked systems will be underpinned by measurement data from millions of sensors, and measurement data are usually expressed in the SI units. The SI is governed by the Metre Convention and the BIPM represents 98 % of the world's GDP. It provides the scientific basis for quality infrastructure. Prof. Ullrich gave an example of this scientific basis by saying that there are about 65 000 laboratories world-wide that follow ISO/IEC 17025, which requests traceability to the SI. He highlighted that the global quality infrastructure requires metrology, standardization and accreditation and that quality infrastructure activities are carried out at the international level and the national level by the NMIs, the national standards bodies and the national accreditation bodies, and at the national level by the certification and inspection bodies and the testing and calibration laboratories. This complex interlinked system, not only for the quality infrastructure, but also for industry, health and science, will require the creation of digitalized processes, involving world-wide agreement on the metadata format for all measurement data, expressed using the SI. There is close collaboration between the BIPM and CODATA on this topic.

Prof. Ullrich noted that the long-term aim of the CIPM Task Group on the Digital SI (CIPM-TG-DSI) is to establish a framework that meets FAIR principles (respecting business and private constraints) and allow all aspects of the international measurement system, measurement results, uncertainties, traceability, and provenance, to be assessed and interpreted digitally, enabling machine-to-machine communication and analysis. He presented a Whitepaper on "Scenarios for digitizing standardization and standards"[24], which defines five degrees of digitalization for Smart Standards. Level 1 is a digital document, for example a PDF, and Level 2 involves making the document machine-readable, for example an XML document. Levels 1 and 2 represent the current situation. Levels 3 to 5 are digital formats that will require interoperable units and quantity representations. Level 3 involves machine-readable and machine-executable content, Level 4 machine-interpretable content and Level 5 machine-controllable content. He suggested that support for Level 5 should start immediately, particularly in terms of terminology.

[24] https://www.din.de/resource/blob/801106/0251eb1280a9a97e53285d42d3bf1fea/whitepaper-idis-en-data.pdf

The CIPM established the CIPM-TG-DSI at its 108th meeting in November 2019. The TG includes an international expert group to provide technical support. The long-term goal of the CIPM-TG-DSI is to come to a world-wide agreed, uniform, unambiguous, authoritative and dependable data framework based on the SI. This initiative is a joint activity with all the stakeholders of the international quality infrastructure. The first workshop in this area "The International System of Units (SI) in FAIR digital data", held on-line in February 2021, had 785 participants from the international quality infrastructure, science, industry, NMIs and RMOs. One outcome of the workshop was the "Joint Statement of Intent on the Digital Transformation", which has been co-signed by eight international organizations. Prof. Ullrich said that the joint statement includes the sentence "*We the undersigned undertake to support in a way appropriate to each organization the development, implementation, and promotion of the SI Digital Framework as part of a wider digital transformation of the international scientific and quality infrastructure*". This is important because it acknowledges that different organizations have different procedures. A first platform meeting of all the signatories of the joint statement is expected to be held in February 2023. He said that governmental support is now required to enable the digital transformation to achieve an even higher impact.

Prof. Ullrich presented the text of Draft Resolution B and said that successfully implementing a comprehensive digital transformation will require the active participation of all stakeholders. He welcomed the recent efforts to articulate guiding principles for a digital transformation in metrology and the establishment of a flexible and inclusive governance structure to support the development and implementation of the transformation. It is anticipated that if Draft Resolution B is adopted, a forum will be set up to discuss metrology and quality infrastructure in the digital world. The forum will include the Consultative Committees, NMIs, RMOs and stakeholders, including from the international quality infrastructure. A draft mission statement has been produced for the forum and the first meeting will be held in February 2023.

Prof. Ullrich encouraged the delegates at the CGPM to adopt Draft Resolution B. He mentioned the paper "Stop squandering data and make units of measurements machine readable."[25], which was published in *Nature* and outreach activities related to the digital transformation, which included the CODATA SciDataCon conference on 22 June 2022, the Webinar with ILAC on 30 June 2022 and the IMEKO TC6 Conference – CIPM Session in September 2022. He concluded by saying that the Metre Convention is the ideal platform to deliver machine inter-operable and comprehensible measurement data.

The President thanked Prof. Ullrich and invited questions.

A representative from the German delegation thanked Prof. Ullrich for his presentation and the Task Group for their work. He commented that Prof. Ullrich had stressed the logical step following the new definition of the SI units is digitalization. It is useful that it is being considered in a comprehensive way and that the discussions have included the QI system and all the stakeholders. He asked Prof. Ullrich to elaborate on the major challenges for the next 10 years to realize the vision for the SI Digital Framework. Prof. Ullrich replied that one of the main challenges is to ensure that the Metre Convention naturally extends its role as the globally accepted anchor of trust for metrology into the digital era. All activities linked to the digital transformation in metrology, for example developing metadata formats or digital calibration certificates are to be based on the concept of the SI being the anchor of trust. A challenge over the longer term is to develop good terminology. A context is needed for the data which is understandable and unique for a machine. Axiomatic mathematicians who are active in standardization are now getting involved in developing terminology. It will be necessary to synthesize the language used in metrology so that it can go into standards in a way that is understood by machine. He commented that these are huge tasks and represent big challenges.

[25] Hanisch R. et al., Stop squandering data and make units of measurements machine readable, 2022, *Nature*, **605**, 222-224. https://doi.org/10.1038/d41586-022-01233-w

Mr Aigar Vaigu (Estonia) commented that Estonia has been offering digital government services for over 20 years. Estonia has lots of experience in digital administration and governance. Therefore, it is convinced that it is not enough to simply digitalize the SI, when the end result is a print out of all the results on paper. Widely-used PDFs are nothing more than electronic representations of papers. He suggested that processes must also be digitalized, alongside the SI. He encouraged a change in the mind-set, not only concerning the SI, but the processes surrounding the SI. When the processes are truly digital, every move or change in the data leaves a trace. It then becomes possible to go back to mistakes or to discover hidden patterns. Real traceability and transparency will give the metrology community power to make the world a better place. However, with great power comes great responsibility. He said that Draft Resolution B is a good starting point, but there is a need to move even faster to be ready for the future. The CIPM can lead the way, but the change has to come from the change of the mind-set within the NMIs. The CIPM can provide direction, but the NMIs need to make it a reality. Prof. Ullrich thanked Mr Vaigu for his comments and support and said that the CIPM has the process in mind and would like to digitalize the processes. He commented that he is aware of how far ahead Estonia is in digitalization and that there is a need to move fast. He expressed his hope that the CGPM would pass Draft Resolution B.

35. Summary of discussions at the informal dotation meeting

Dr Louw, the CIPM President, reported on the dotation discussions held during the informal meeting on 16 November 2022. He recalled that a preparatory meeting had been held on Monday 14 November.

Dr Louw said that there is general support for the provisional dotation and that it is important that if there are any concerns, he should be informed immediately. He reminded delegates that any issues should be discussed and resolved before the voting on 18 November, because this is a very important part of the conference. If the dotation is not concluded during the conference, the CIPM would need to call an extraordinary meeting of the CGPM to finalize the process. He stressed that any concerns from on-line participants regarding the dotation can be sent directly to the President via the ‘chat’ function.

Dr Abdu Abagibe Adem (Ethiopia) made a comment that was not related to the dotation. He asked if the promotion of quality issues in developing countries could be included in the strategic plan. This would enable such countries to improve their quality systems and their competitiveness. Dr Louw thanked Dr Adem and commented that Ethiopia is building a new metrology institute and is doing much work to improve its systems. He added that although ‘development’ has not been included explicitly in the strategy, the essence of Draft Resolution F “*On universal adherence to the Metre Convention*” demonstrates that this is an issue that is of high importance to the CIPM, however it may need to be made more visible.

36. Report from the Co-Chairs of the *ad hoc* Working Group of Member State Representatives

Mr Robert Gunn (UK) and Mrs Daniela Arruda Benjamin (Brazil), the Co-Chairs of the *ad hoc* Working Group of Member State Representatives (WG-MS), gave a presentation on its work. They said that the purpose of the Group was to exchange views on institutional matters. According to its terms of reference, the WG-MS examined the roles, responsibilities, and relations of the organs set forth under the Metre Convention, clarifying how best to distinguish their work, whilst considering

principles of clarity and transparency, and hence to assist Member States with their preparations for the 27th meeting of the CGPM. There had been useful discussions within the Group based on these principles. However, it had not been able to meet as many times as planned due to the pandemic.

Mrs Benjamin gave a summary of the process followed by the Group to collect information, which included gathering the views of Member State representatives by email, sharing documents via a website, and holding four on-line meetings. A discussion paper was drafted that identified areas of agreement and divergence. The Group was not able to reach a full consensus on all the issues it addressed, however, it had been possible to identify some areas of general agreement. A consensus was reached to clarify that the Metre Convention signed on 20 May 1875 created an international organization, composed of three organs with specific roles. As a result, the Group was able to clarify the language used to refer to the States Parties to the Metre Convention. A second and important point made by the Member States is that there is a need for clear rules on the roles and relations among the different organs of the organization. The CIPM, with which the Group has been closely working, agreed that these concerns should be further explored and is planning to work on developing By-laws and Rules of Procedure (RoP) for the organization, for approval at the next Conference in 2026. This is an important action and will enhance the transparency and the efficiency of the organization. It is also important to ensure that Member States be given the opportunity to comment on the draft.

Mrs Benjamin hoped that the By-laws will establish clear principles and serve as a reference to all Member States. Progress has been made with some of the ideas on how to proceed to develop such By-laws and the CGPM is encouraged to invite the CIPM to be as inclusive as possible in their development.

Another important point discussed by the Working Group is to ensure that the new technologies and virtual tools used by the Organization through the Covid-19 pandemic continue to be used widely. These tools have assisted with the continuity of the work of the Group and should continue to be used to enhance interaction with Member States between meetings of the CGPM. In addition, new technologies and virtual tools have helped to increase the participation of delegates in technical discussions. In summary, the CGPM should provide the CIPM with a mandate to complete work on the By-laws and Rules of Procedure (RoP), for approval at the next meeting of the CGPM.

The President thanked Mrs Benjamin and Mr Gunn and invited comments.

Prof. Kühne (Germany) said that the By-laws should be prepared in close cooperation with the representatives of the Member States. He hoped that by the time of the next CGPM, it will be possible to approve them and the issues will be settled.

Dr Chambon (France) said that France is the depository of the treaty. It is clear from the French perspective that there is no confusion, the BIPM is the International Organization created in 1875 and has been existing for practically 150 years. This International Organization is an example of world-wide scientific cooperation; for France, there is no issue concerning the name of the Organization. She said that the By-laws make sense to clarify some rules applicable to the organs and to the role of the Director. She reiterated that clearly, for France, the name of the International Organization is BIPM.

Mrs Benjamin commented that this was the most contentious and passionate issue for discussion, which is a reflection of how Member States are attached to the organization. She clarified one point: there is no proposal, at this stage, to give a new name or to change the name for the organization. What is being suggested at this point, for the sake of clarity, is to make sure that when the By-laws are discussed,

it is clear what is being referred to. There is no proposal to have a decision on the name or even to continue the discussions on the name.

Dr Saundry (USA) thanked Mr Gunn and Mrs Benjamin for leading the Working Group, particularly through the pandemic, when its work had to be carried out on-line and by exchange of emails. She acknowledged that there have been a lot of discussions on names and roles and agreed that the By-laws need to make clear what is being referred to when describing certain functions.

Mr Gunn concluded by saying that he was grateful for the contributions received from everyone and that the Group could not have done its work without them.

Fifth session – 17 November 2022 (afternoon)

The President of the CGPM welcomed the delegates to the fifth session.

37. Time and Frequency Metrology in Space Missions

Dr Javier Benedicto, The European Space Agency (ESA) Director of Navigation, said that the ESA has been developing satellite navigation systems for the last 30 years and has two important systems in operation: the European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) and Galileo. These systems contribute to providing services to billions of users world-wide and rely on timing and frequency distribution techniques.

He highlighted the time and frequency needs in space missions, noting that the needs stem from different requirements. There is a need to generate signals from the satellites, which are stable or ultra-stable. These time signals need to be tagged with time references, which are generated on board and are very often synchronized with ground clocks. A high degree of autonomy from the ground is required for some missions, for example exploration missions where satellites operate millions of kilometres from the Earth. The time and frequency requirements are tailored to the specific mission; there is no standard way of generating time on board satellites, it depends on the type of mission.

The ESA has a number of key missions which are building on the generation of time in order to produce high-quality data. Gaia is recognized to be one of the most powerful scientific missions, generating a lot of science data to create a 3D map of the galaxy. Gaia is collecting data, which needs to be time tagged. Without this time tagging, it is very difficult to recompose this information back on the Earth when working on the cartography. Gaia's on-board time-tagging uses a rubidium atomic clock with a frequency stability of <17 nanoseconds over 6 hours. The Cassini-Huygens mission to Saturn and its moon Titan, used rubidium clocks in both its receiver and transmitter. The Gravity Probe-A mission by the USA in 1976 used a hydrogen maser to demonstrate, for the first time, Einstein's red shift theory from space.

The Chinese Mengtian mission, which was launched in October 2022, contributes to the Chinese space station and includes on-board very-high-accuracy clocks. The European Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) mission is composed of two types of clocks, one clock called PHARAO, which is an atomic clock based on laser-cooled caesium atoms, which is providing very-high stability, and will probably be the most accurate clock in orbit. This is combined with another clock, SHM, which is an active hydrogen maser. The ACES mission is planned for launch in 2025.

Dr Benedicto said that the Galileo system is operational and consists of 28 operational satellites, each with four ultra-stable clocks. The clocks use two different technologies; passive hydrogen masers and rubidium clocks. Galileo is an extremely powerful resource, which provides Global Navigation Satellite System (GNSS) services, but it also contributes very effectively to the international timing community. There are four GNSSs in use: GPS (USA), Galileo (EU), GLONASS (Russian Federation) and BeiDou (China). All four systems are based on timing techniques in order to provide positioning services to users. He gave a brief summary of how satellite navigation systems work. All satellites are synchronized to a system time, which is based on atomic clocks. The satellite position and clock are estimated and predicted by the Ground Mission Segment. Each satellite transmits its own identification and position, as well as its time and the health status as part of a navigation message. Based on time measurements, the user calculates the distance to each satellite and then its own position. To simplify the design of the user equipment, at least four measurements are required. Satellite Navigation Systems

provide the position, velocity and time information to users and depend on Coordinated Universal Time (UTC); the issue of the leap second, which will be discussed later in the conference, are of high importance to the satellite navigation community.

Each GNSS needs to be autonomous from the timing point of view and it is necessary to provide the offset with respect to its own system time as well as the offset with respect to UTC. GNSS providers need to link to the Earth-based time on a reference system with high accuracy, such as UT1 versus UTC offset. There is specific information on all those parameters, which is provided in the Signal-in-Space Interface Control Document, which is published for Galileo. Two representations of this information are offered: a broadcast is made for all users between the Galileo System Time (GST) - the offset between GST and UTC. In addition, the offset between GST and the GPS System Time is broadcast. This second offset is important, because it ensures interoperability at the receiver level between measurements of the GPS signals and measurements of the Galileo signals.

Dr Benedicto said that a very accurate means of monitoring the time of the multiple GNSS systems is required in order to provide these services. Facilities have been developed and are deployed in the GNSS technical centres, which monitor in real time, all the time parameters, which are being broadcast by the different systems. “Time” could be easy, but there are a number of difficulties from an operational point of view. Firstly, it is necessary to appreciate that UTC is an international recognized standard. From a systems operational point of view, a real-time and continuous time scale needs to be provided to avoid risk of failure. Synchronization to UTC in the Galileo system is achieved by “modulo 1 second” algorithms on the ground; this is particular to Galileo but not on the Russian GLONASS system. The varying number of leap seconds over time needs to be managed operationally. This was last carried out in 2016, when operational measures had to be implemented on the ground segments and on the message broadcast to users.

Each leap second introduction causes or can cause interruptions. In 2016 the entire international user community had to be informed about the introduction of the leap second in the Galileo operations, representing an interruption to the daily operation of the services. Some user receivers do not correctly handle the leap second implementation. Each GNSS system time has a different tagging system for the seconds and a different way of broadcasting its own system time versus UTC. In addition, there is a different implementation of the leap second by the different systems; in particular for Galileo and GLONASS. This is putting at risk the interoperability between the systems and creates confusion and uncertainty at the user and receiver level. In addition, some user applications make use of the system time, which is computed by systems such as GPS or Galileo, as a reference for time tagging. For example, this is the case for telecommunication networks as well as energy, gas and electricity distribution networks, which use GPS time or Galileo time for synchronization purposes. Financial transactions use time tagging which is accurate to the nanosecond level. This time tagging uses time references which are connected directly to GPS or Galileo. However, each system provider creates its own time reference and this creates a multiplicity of time notions around the world, which is becoming more of an issue. GNSS operations could be simplified without leap seconds and interoperability would be improved. GNSS operations would become more straightforward for the users and it would prevent transitions at the user level and at the level of system operations. The GNSS community is also facing the possibility of the first “negative leap seconds”, which would reflect an acceleration of the rotation of the Earth. This is a cause for concern and could be a source of confusion, since it has never been tested in reality.

Dr Benedicto presented two examples of future plans for improved clocks for implementation in satellite missions to improve the accuracy of GNSS: the strontium optical atomic clock, which is being developed by the Observatoire de Paris/SYRTE and the NASA Deep Space Atomic Clock (DSAC), which will fly in the future and will provide unprecedented accuracies. A substantial programme of

development of new clock technologies for on-board atomic clocks is taking place in Europe in the context of the Galileo programme. These clocks will replace, in the long term, rubidium and passive hydrogen maser clocks that are in use on the satellites today. The ESA is examining technology diversity in order to be robust in orbit. The ESA is also looking at a combination of technologies, which provide very high stability in the short term and high stability in the long term. When combined, these give a lot of operational robustness. These technologies include the rubidium two photons optical clock, iodine optical clock, rubidium pulsed optical pumped clock and optically pumped caesium clocks.

There is a wide variety of developments under way in Europe, which are funded by European Space Agency and the European Union. The ministerial conference of the European Space Agency's member states will be held in November 2022, where the budget for the European Space Agency will be decided for the coming years. The Navigation Directorate has two proposals for novel and far-reaching missions. Genesis is a programme which will implement, for the first time, the colocation of four key and different geodetic navigation techniques on-board one single satellite. This will allow for the co-localized calibration of the measurements of those four instruments. It will allow a substantial improvement of the determination of the accuracy of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF). The mission has a very ambitious target of providing a technical method for ITRF calibration with up to one millimetre accuracy, with a 0.1 millimetre stability over the years. The mission will establish a very accurate reference of the ITRF. The Genesis mission will also contribute to observing or calibration of the Earth's rotation parameters, which is indirectly important for discussions regarding the long-term evolution of the global time references. The second initiative is the ESA Moonlight mission. The proposed Moonlight mission will establish the first communication and satellite navigation network around the Moon and on its surface. The Moonlight mission will establish a dedicated constellation of satellites around the moon and will present new challenges, which will need to be addressed in order to make the exploration of the Moon sustainable.

Dr Benedicto concluded his presentation by highlighting a number of key points from the presentation. A continuous timescale is very advantageous for any space systems operations. All the space systems that the ESA are implementing have their own specific requirements, but providing a continuous timescale is necessary for all of them. Space systems need real-time timescales, with a high level of continuity, availability and reliability. Attention needs to be paid to the technology and a number of examples of diversification of technology have been mentioned. Any technology used on a satellite has to be reliable and operational in space. Space systems need to be synchronized to a recognized ground reference, for example UTC. GNSSs broadcast "a prediction of UTC", by providing the offset parameters with the real-time signals to users. GNSS providers therefore contribute to the provision of a real-time, universal UTC time service. The offset UT1-UTC is needed with the highest accuracy, in the range of microseconds. There is a future requirement for better clocks, with improved stability and greater accuracy, which can contribute to improved GNSS accuracy. There is also a need to improve the robustness of clock technology for GNSS.

Dr Benedicto stressed that space exploration needs to address interoperability in the time metrology domain and in the reference systems. The involvement of the metrology community is considered to be essential. He invited the CGPM to engage in future discussions and to contribute to the universal endeavour to support the reference definition, to which the ESA is fully committed in cooperation with its international partners.

The President opened the floor for questions and comments.

Prof. Ullrich (CIPM) asked if the ESA has any plans for optical clocks on geostationary satellites. He said that China is considering this technology and that it would provide a timescale at the level of 10^{-18}. Dr Benedicto replied that satellite navigation systems are composed of an architecture where

there is a combination of satellites in geostationary orbit and satellites in medium-Earth orbit. In the future satellites will be deployed in low-Earth orbit. He confirmed that the ESA is planning to use optical clocks on navigation satellites and the activity is already well advanced.

38. Optical clocks at 10^{-18} accuracy: challenges and applications

Mr Salomon, Research Director at the Centre national de la recherche scientifique (CNRS) recalled that he had attended the 27th meeting of the CGPM in 2018 during the historic vote to revise the SI and noted that the second is the last unit that has not yet been redefined. He gave an overview of clock technology, particularly the current state of optical clocks, which are now at a relative frequency stability of 10^{-18}. To put this accuracy into context, if two clocks started in phase at the beginning of the universe 14.5 billion years ago, today they would only differ by less than one second, which demonstrates the tremendous stability of these instruments.

Mr Salomon said that there is a full range of applications for optical clocks, which operate on the ground, in laboratories and in space. Art Schawlow, Nobel Prize laureate for the invention of the laser, said in 1981, "If you want to measure something precisely, you better measure frequency." In order to make a high-precision measurement, it is necessary to conceive the apparatus in such a way that it measures frequency. This is exactly what has been done with all the units in the revised SI. The second is at the root of all modern precision measurements because time is the most precisely determined quantity in the physical world.

The concept of the clock started with counting oscillations of the Galileo pendulum. Modern optical clocks rely on electromagnetic signals that oscillate at a rate of 10^{15} cycles per second and when counting oscillations, shorter periods give a more precise time interval measurement. He described the theory of the atomic clock, which is a composite system that uses both a physical oscillator, such as quartz, and a laser. The current definition of the second is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency, $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}. Using the caesium atom provides universality and quantum mechanics govern the position of the energy levels. The oscillation is a light field that excites the caesium atoms from the ground state, *f*, to the excited state, *e*. The energy difference between these two states is determined from the Planck-Einstein relation and the physical oscillator, whether it is quartz or a laser is also subject to the drift. Therefore, the clock combines the intrinsic stability of the energy level difference in an atom with the physical oscillator. Caesium atomic fountains have been operating for around 30 years and are used in many NMIs. Mr Salomon noted that International Atomic Time (TAI), which is computed by the BIPM, relies on twelve caesium fountains around the world that are compared by GPS and optical fibres and have an accuracy of 2×10^{-16}.

Mr Salomon presented the formula for the "clock figure of merit":

$$\mathcal{F} = \nu / \Delta\nu \times S/N = 2\ \nu\ T\ S/N$$

Frequency: ν

Resonance width and interaction time: $T\ \Delta\nu=1/2T$

Signal to Noise ratio: S/N

For microwave caesium fountains the value of $\mathcal{F} = 5 \times 10^{-13}$ and for optical clocks the value of $\mathcal{F} = 5 \times 10^{-16}$. The signal to noise ratio of optical clocks is improving but has not yet reached this number, however he said that there is no fundamental reason as to why these numbers should not be

achieved. He noted that there are two families of optical clocks: those that use trapped ions and those that use neutral atoms. A considerable amount of work is being carried out on both types of optical clock. Mr Salomon said that the accuracy of time when the second was redefined in 1967 was 10^{-12}. The accuracy of the caesium (microwave) standards has improved by a factor of ten every ten years, to the level of 1×10^{-16} in 2020. The optical standards, which operate in the visible part of the spectrum, were in the range 10^{-12} before the year 2000, until John Hall and Theodor Hänsch won the Nobel Prize for Physics in 2005 for their development of the frequency comb technique, which is a way to measure optical frequencies. The accuracy of the optical standards reached 10^{-18} in 2020.

Mr Salomon introduced the technology used in ^{87}Sr optical clocks. The interrogating oscillator is a laser beam which is stabilized in a silicon cavity at low temperature. The integrating atoms are confined in an optical lattice, with 5-10 atoms trapped at each potential so that the density remains low. It is possible to trap the atoms without perturbing the energy levels by using a "magic trapping laser frequency", whereby the light shift of the ground state of the atoms is exactly equal to the light shift of the excited atoms. Both levels are perturbed by the laser field, but they are perturbed exactly the same way (at the 10^{-6} or 10^{-7} level). Hidetoshi Katori invented the magic trapping laser frequency technique in 2003. The figure of merit of the ^{87}Sr optical clocks is extremely high as a result of the light shift conservation technique. The strontium clocks enter the sub-10^{-18} region in frequency stability and the accuracy is also in the range of one part in 10^{-18}; this equates to about one centimetre of gravitational red shift. This opens new applications for these clocks in geodesy, because it is possible to measure locally the gravitational potential of the clock, and whether this gravitational potential changes, for example, as a result of the crust of the Earth rising or falling due to deglaciation because of global warming.

A group at JILA (USA)[26] has demonstrated the outstanding stability that these clocks can reach. The clock frequency of the upper part of a one millimetre-long atomic sample was measured, and compared to the clock frequency of the lower part of the clock. A difference of the red shift was observed, but now at one millimetre. The measurement of this 10^{-19} frequency shift was made with a 10 % accuracy. The capacity of the clock to make differential measurements is excellent and goes below 10^{-20}. Mr Salomon said that a research group in Japan, lead by Hidetoshi Katori, has developed transportable optical clocks that have been used to test the Einstein effect (a clock at a higher altitude ticks faster than one at a lower altitude) at the 450 m-high radio tower, known as the Tokyo Skytree[27]. The gravitational redshift was 21 hertz, exactly in accordance with Einstein's prediction.

Mr Salomon concluded his presentation by looking at future applications of optical clocks. The signal to noise ratio of optical clocks and fountains is at the quantum limit, what is known as the 'standard quantum limit'. In quantum mechanics there is a commutation relation between the various observables. At the quantum limit, the frequency stability scale is the square root of the number of the atoms, the inverse of the square root for the noise: the more atoms, the less noise. However, quantum mechanics does not prevent improvements to beyond this point. It is possible to improve the quantum noise and this is known as a quantum-correlated system. The standard quantum limit for uncorrelated atoms scales as $1/N^{1/2}$. When correlating atoms it is possible to reach a stability by using the number of atoms, rather than the square root, which gives an improvement in the noise. A team at Stanford (USA) has made progress in this area and has measured the noise 100 times lower than the standard quantum limit.[28] The research coupled the atoms into an optical cavity, and this cavity field correlated the atoms together. It was possible to show a 20 dB noise reduction on the variance. The signal to noise ratio has been improved by a factor of 10.

---

[26] Bothwell, T., Kennedy, C.J., Aeppli, A. et al. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature* **602**, 420-424 (2022). https://doi.org/10.1038/s41586-021-04349-7

[27] Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N. et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nat. Photonics* **14**, 411-415 (2020). https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8

[28] Pedrozo-Peñafiel, E., Colombo, S., Shu, C. et al. Entanglement on an optical atomic-clock transition. *Nature* **588**, 414-418 (2020). https://doi.org/10.1038/s41586-020-3006-1

Mr Salomon said that optical clocks now surpass microwave clocks by two orders of magnitude. They have daily fluctuations of 0.1 to 1 picosecond. A new definition of the second is required and there are three options: using one atomic species; a combination of atomic transitions[29]; or fixing another fundamental constant, such as the electron mass. Discussions on the new definition of the second will need to consider the timing of the redefinition, and which atoms to use if one of the first two options is chosen. Mr Salomon gave a brief overview of future perspectives by saying that optical fibre links and frequency combs enable continental optical clock comparisons at an adequate level. However, satellite missions like ACES will enable intercontinental clock comparisons below 10^{-17} from 2025. The Einstein effect, the red shift of clocks in gravitational potential, will allow development of a new relativistic geodesy using optical clocks. Earth potential fluctuations will limit the precision of time on the ground at 10^{-18} to 10^{-19} (i.e. cm - mm). The solution will be to have a reference clock in high Earth orbit where fluctuations are reduced. Quantum Metrology will improve clock performance through quantum correlations.

The President thanked Mr Salomon and asked if there were any questions.

Dr Milton recalled that the presentation had started with Schawlow's famous quote about, "Never measure anything except frequency" and then mentioned that time and frequency are equivalent. He commented that technology is required to transform the output from a frequency standard into a clock. One of the diagrams presented showed a cryogenic cavity designed for the strontium standard. He asked if further advances are coming with spin squeezing and if there is going to be sufficient advances in the stable cavity technology to be able to take advantage of these and to turn those frequencies into clocks.

Mr Salomon replied that cavity technology has undergone many advances; if atoms are interrogated with a laser that has too many fluctuations there is no gain in the signal-to-noise ratio, as would be expected. In this situation the atoms are intrinsically so stable that a very stable 'local oscillator', the physical signal that interrogates the atoms, is required. The cold cavity at 70 kelvin has reduced thermal fluctuations. The local oscillator can be considered simply as the thermal noise of the mirror. The mirror is used because of thermal fluctuation; its distance fluctuates very slightly and produces noise on the laser. In effect, the laser serves as a flywheel and the atoms are interrogated every three seconds. There is dead time that may cause problems. It is then necessary to sever the cavity or essentially to sever the output of the clocks to stabilize the laser on the atoms. There is a gain whereby it is necessary to improve the laser system to take advantage of improved coherence of the atom-light interaction and these improvements progress together. He said that the limit has not yet been reached for optical clocks and it is possible that optical clocks at 10^{-19} or 10^{-20} will be developed in the coming years. He suggested that the metrology community should not wait too long for the redefinition of the second, otherwise the same problem may arise as for electrical units, with the Josephson effect and the quantum Hall effect, which are drivers from the SI units for current and voltage. There are of course conditions for the redefinition of the second and the CCTF is discussing this at length. He said that the conditions are important because it is not possible to simply 'measure frequency'. The cycles have to be retained without losing one cycle; time is a time interval and over a time interval, the cycles must be counted without losing one. For this reason, the local oscillator, the laser on the cavity, must be very stable over a long time.

Dr Steele (Canada) commented that Mr Salomon's presentation had suggested that there was a preference for using either one atomic species or a combination of atomic transitions in the redefinition of the second, rather than the electron mass. He asked him to comment on the two options for picking a single species versus an ensemble, and what are the pros and cons of each. Mr Salomon said that both options have pros and cons. For the single-atom solution the atom will have to be chosen and it is not obvious at present because they have very similar performance, mostly from the neutral atoms system. Choosing the single

[29] Jérôme Lodewyck 2019 *Metrologia* **56** 055009 https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab3a82

atomic species could be arbitrary at the present time and there is the danger that if one is chosen and then in five years a new atomic clock is developed, for example using thorium, that may have far less systematics, the time metrology community may regret having made the earlier choice. The second solution is more complex because it would require an average of the optical clocks with some weight, however this is what is carried out at present with the secondary representation of the second by the CCTF and CODATA. This method is more robust because it uses what is currently available, however the question may arise regarding when a redefinition or adjustment to the weight will be required. It can be considered as an evolving definition, and the key requirement is to maintain continuity. Mr Salomon concluded by giving his personal opinion that the leap second is a disaster and encouraged the metrology community not to keep it.

39. Report from the President of the CCTF

Dr Dimarcq, President of the Consultative Committee for Time and Frequency (*Comité consultatif du temps et des fréquences*, CCTF) presented his report on the activities of the CCTF since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCTF Executive summary

The CCTF has mainly focused the last years activities on four "hot topics," that will require decisions in the next years:

1. the redefinition of the SI second based on one or several optical transitions;
2. a revision of the leap-second procedure to realize a continuous UTC;
3. the requirements for supporting the traceability to UTC through GNSS measures; and
4. the establishment of a capacity building project based on shared resources with the NMIs, and with the sponsorship of the IEEE UFFC society, to transfer the technology allowing the realization of a local robust UTC(k) time scale, and a more widespread involvement in the generation and dissemination of UTC.

A *Metrologia* special Focus issue[30] is under preparation to address these topics. In addition two draft resolutions will be considered by the 27th meeting of the CGPM in November 2022

- Draft resolution D: "*On the use and future development of UTC*"
- Draft resolution E: "*On the future redefinition of the second*"

Scope of the CCTF

CCTF activities concern matters related to the definition and realization of the second, establishment and diffusion of International Atomic Time (TAI) and Coordinated Universal Time (UTC), and advice to the CIPM on matters related to time and time scales.

Strategy

The CCTF mission is to support the development of frequency standards, time scales, and time and frequency transfer methods, to serve the need of the society.

[30] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac98cb and https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac9da5

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities and achievements

To address the four hot topics, the CCTF has created dedicated task groups with more than 80 people working together with bimonthly meetings, dedicated workshops, presentations in fora, congresses, and online forum hosted on BIPM's GitHub account.

The following list reports the special task groups and their Chairs:

Updating the Roadmap towards the redefinition of the SI second Roadmap and mandatory criteria	(N. Dimarcq, P. Tavella)
Request from user communities, NMIs and Liaisons	(M. Gertsvolf, NRC; G. Mileti, University Neuchatel)
Atomic frequency standards, and possible redefinition approaches	(S. Bize, SYRTE; E. Peik, PTB; C. Oates, NIST)
TF Dissemination and time scales	(D. Calonico, INRIM; T. Ido NICT)
Leap seconds in UTC and building a consensus for a continuous timescale	(J. Levine, NIST; P. Tavella, BIPM)
Promoting the mutual benefit of UTC and GNSS, including Traceability to UTC from GNSS measurement	(P. Defraigne, ORB; A. Bauch, PTB)
Sharing Resources to Improve the International Timekeeping	(M. Gertsvolf NRC, Y. Hanado, NICT)

The CCTF has issued several recommendations on the different hot topics, some of which include recommendations to other organizations to which the CCTF activities and recommendations were presented.

1. Roadmap towards the redefinition of the second
   Two Recommendations approved by CCTF and Draft Resolution E to the CGPM
2. Leap seconds in UTC and building a consensus for a continuous timescale
   One Recommendation approved by CCTF and Draft Resolution D to the CGPM
3. Promotion of the mutual benefit of UTC and GNSS (including traceability of GNSS signals to UTC)
   Three Recommendations approved by the CCTF
4. Sharing of resources to improve international timekeeping
   Recommendation approved by the CCTF

In addition, three other Recommendations were approved by CCTF (optical frequency standards, Time transfer technology)

A *Metrologia* special focus issue is being prepared, which includes four papers:

1. CCTF strategy introduction
2. Roadmap towards the redefinition of the second
3. Towards a consensus on a continuous Coordinated Universal Time[31]
4. Achieving traceability to UTC through GNSS measurements[32]

A white paper on each hot topic will be published in early 2023[33].

[31] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac9da5
[32] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ac98cb
[33] https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/publications

Challenges and difficulties

The CCTF has worked in close cooperation with the liaison organizations and with all the CCTF members to build a consensus on the CGPM draft resolutions. This has required several meetings, on-line discussions, participation to international fora, and congresses.

Outlook in the short and long term

Continue to follow activities, trigger and foster reflection, studies and collaborations on:

- Primary and secondary standards, with a connection to the CCL
- TF transfer techniques: GNSS, TWSTFT, advanced techniques such as optical fibres, ACES MWL, optical links in space
- Time scales: TAI, UTC, UTCr, UTC(*k*), algorithms
- CIPM MRA and Metrological traceability.

Continue to support transverse activities related to Hot Topics, detailed in the roadmaps described in Draft Resolutions D and E.

CCTF Data

CCTF set up as the CCDS in 1956, renamed CCTF in 1997

President:	N. Dimarcq
Executive secretary:	P. Tavella
Membership:	26 members, five liaisons, four observers
List of CCTF members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	28-29 October 2020, 11-12 March 2021, 29 June-1 July 2022
Full reports of the CCTF meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/publications
Nine CCTF Working Groups:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/

- CCL-CCTF Frequency Standards (WGFS)
- CIPM MRA (WGMRA)
- Coordination of the Development of Advanced Time and Frequency Transfer Techniques (WGATFT)
- GNSS Time Transfer (WGGNSS)
- Primary and Secondary Frequency Standards (WGPSFS)
- Strategic Planning (WGSP)
- TAI (WGTAI)
- Time Scale Algorithms (WG-ALGO)
- Two-way Satellite Time and Frequency Transfer (WGTWSTFT)

CCTF Comparison activity	Completed	In progress	Planned
CCTF key comparisons (and supplementary comparisons)	1, monthly	Ongoing (+1)	ongoing
BIPM comparisons	0	0	0
CC pilot studies	0	0	0
CMCs	776 CMCs in 19 service categories registered in the KCDB		

40. Introduction to Draft Resolutions D "On the use and future development of UTC" and E "On the future redefinition of the second"

Dr Dimarcq, President of the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF), gave an overview of the CCTF and noted that its work since 2018 has focused on four "hot topics". The CCTF created four Task Groups in 2020 to coordinate the work on these hot topics:

1. Updating the Roadmap towards the redefinition of the SI second
2. The implementation of leap seconds in UTC and building a consensus for a continuous timescale
3. Promoting the mutual benefit of UTC and GNSS, traceability to UTC from GNSS measurement
4. Sharing resources to improve the international timekeeping.

The first two Task Groups have focused on the development of Draft Resolutions D and E, which will be described in detail later in the presentation. Task Groups 3 and 4 have also been active. The promotion of the mutual benefit of UTC and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is linked to the presentation given by Dr Benedicto. Most UTC clocks are compared by GNSS and GNSS disseminates the approximation of UTC and collaborates with the UTC laboratories. In the reciprocal way, the synchronization of GNSS to UTC supports interoperability between the different GNSS systems. The CCTF has proposed and discussed guidelines to recognize traceability to UTC from GNSS measurements through different configurations that are being analysed. The sharing of resources to improve international timekeeping is proven through the construction of UTC from an ensemble of approximately 450 atomic clocks in 85 time laboratories around the world. These laboratories vary in size and the capacity to monitor and validate the measurements in each laboratory improves the quality of UTC and the realization of UTC(k). The CCTF aims to build new capacities by sharing the resources among laboratories to develop a good level of expertise in all laboratories; if the expertise is improved, the quality of data is improved, and so consequently, the overall quality of UTC is improved. For example, the BIPM recently signed a collaboration agreement with the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) recognizing the common aims to improve training in time and frequency metrology.

Dr Dimarcq summarized the outlook for the CCTF. He noted that it will continue to follow activities, trigger and foster reflections, studies and collaborations on: primary and secondary standards, with a connection to the CCL; time and frequency transfer techniques; time scales; and the CIPM MRA and metrological traceability. The CCTF will continue to support transverse activities related to the "hot topics", along with the roadmaps described in Draft Resolutions D and E. He said that a Focus issue of *Metrologia* is in preparation under the title "Focus on Challenges in Time and Frequency Metrology".

The President thanked Dr Dimarcq and asked if there were any questions on the activities of the CCTF before continuing with the introduction to Draft Resolutions D and E.

Dr Milton commented on the great success that the CCTF has had in addressing the four hot topics: two of the hot topics have led to the drafting of resolutions, that will be discussed next. The third topic, that of traceability of GNSS timescales, is a quiet revolution in the way NMIs think about traceability of GNSS timescales. He noted that without the epochal changes proposed in Draft Resolutions D and E, the traceability of GNSS timescales alone would have been a very significant step forward by the CCTF since 2018. He congratulated the CCTF and acknowledged the considerable amount of work behind the scenes needed to support what it presented at the Conference.

Draft Resolution D

Dr Dimarcq continued by introducing Draft Resolution D "*On the use and future development of UTC*". He said that technological and digital applications which underpin national critical infrastructures are based on temporal synchronization. Besides accuracy and stability, the essential requirements for the common time scale are that it is continuous, monotonic, reliable, and readily available. The International Atomic Time (TAI) is constructed by the BIPM and relies on the weighted average of 450 atomic clocks in 85 time laboratories around the world with frequency steering by approximately ten primary and secondary frequency standards. Since 1972, UTC has been obtained from TAI plus leap seconds. Universal Time (UT1) is defined by the Earth's rotational angle, which is affected by random fluctuations. When the difference between UT1 and UTC becomes too large, an integer second is inserted into UTC to ensure [UTC - UT1] is always less than one second. A problem arises because the perturbation cannot be predicted precisely. Digital networks are unable to cope with unpredictable leap seconds because computer operating systems are not able to handle a minute with 61 seconds. The CCTF carried out a user survey in 2021, which received more than 200 replies. The large majority of respondents asked for the discontinuities caused by the insertion of leap seconds to be removed from UTC. It was also reported that time scales other than UTC are being used as continuous time scales.

Dr Dimarcq reiterated that UTC is the international time standard. It is supported by 85 time laboratories that provide data and realize real-time traceability under the authority of the CGPM. The International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) computes and publishes the difference UT1-UTC. The International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) ensures that it is correctly transmitted. However, users that underpin critical infrastructures need a continuous and unique timescale. Increasingly UTC is not being used by the GNSSs, the digital network giants (for example GAFA and Alibaba), and the most widely used internet time synchronization protocols such as Network Time Protocol (NTP) and Precision Time Protocol (PTP).

A number of *ad hoc* methods have been developed to avoid inserting leap seconds. These methods include ignoring leap seconds after initial synchronization (for example GPS, Galileo and BeiDou system times), stopping the clock for two seconds at 23:59:59 or 00:00:00 (for example NTP), and reducing the frequency of the clock over a certain interval (for example Google, Microsoft, Facebook and Alibaba). None of these methods are in agreement with UTC regarding the leap second "day", and many disagree with each other. In addition, users of these different services cannot tell which method is used, especially *a posteriori*. Dr Dimarcq stressed that the leap second itself and the alternative methods for implementing it threaten the resilience of the synchronization and it is urgent to revise the whole leap second process as it is applied to UTC.

The proposed solution is to increase the tolerance in [UT1 – UTC] to a new limit. UTC would remain linked to UT1, the Earth's rotation angle, whose origin is the reference meridian of Greenwich. In daily life, there would be no discernible change for the general public, since the evolution of [UT1 – UTC] will remain negligible compared to the plus or minus 15 minute seasonal day variations, for centuries to come. The general perception of conformity to astronomical phenomena would not change. Any users that require knowledge of UT1-UTC will find accurate and real time estimations through the services of IERS, NASA, GNSS, and ITU-R broadcast signals.

Dr Dimarcq recalled that in the 1970s UTC was used as an approximation to UT1 mostly for navigation using traditional optical instruments. The approximation UTC ≈ UT1 corresponds to an uncertainty in the position up to 400 m (at the equator) and is used in low-accuracy applications. However, it is not suitable for high-precision applications (for example high-accuracy astronomy and space applications) that already use the IERS and NASA estimates with 10 microsecond uncertainty, corresponding to about 3 mm uncertainty in position.

Dr Dimarcq said that there is overall acceptance for the enlargement of the tolerance in [UT1 – UTC]. It is supported by numerous organizations and there have been many meetings to discuss technical, legal and political aspects of the proposed changes.

He summarized Draft Resolution D by saying that the proposal is to have a two-step process. The first step is to ask for CGPM approval at its next meeting in 2026, to enlarge the tolerance in [UT1-UTC] and to approve the implementation date by or before 2035. The second step, at the 28th meeting of the CGPM, would be to approve the value of the new tolerance, whether it be one minute, one hour or an infinite value and to approve a periodic review process to take into account new discoveries and improved understanding for the irregularities in the rotation of the Earth. He said that an implementation date not later than 2035 has emerged from discussions as the best trade-off between the need to update systems and address legal issues and the important issues that: discontinuities in UTC and different *ad hoc* solutions currently implemented cause confusion and put at risk the resilience of critical national infrastructures; the current acceleration in the rotation of the Earth may lead to possible negative leap seconds in the next decade; and one of the GNSS time scales may be used *de facto* as the international standard.

Dr Dimarcq said that the issues surrounding Draft Resolution D are complicated and sensitive. He thanked the CCTF, all external experts, the BIPM Director and the BIPM Time Department, for the fruitful discussions, support, and contributions.

The President thanked Dr Dimarcq and opened the discussion.

Ms Macdonald (Canada) confirmed that, as indicated in a written statement that Canada had submitted before the meeting that it supports Resolution D and encourages other CGPM delegates to approve the resolution. If the Draft resolution is approved, Ms Macdonald urges the time and frequency community to embrace the invitation in the phrase ‘in or before, 2035’ within the resolution, to accelerate the implementation of the technical solution, keeping in mind the initial recommendation from the CCTF was to make the implementation no later than 2030.

Mr Mikiel (Poland) said that he had written a letter to the BIPM in which Poland offered its full support to the resolution and does not see any reasons to change the text of the draft resolution. He added that Poland thinks that not accepting the draft resolution submitted by BIPM may cause some serious problems, for example for IT companies or other important sectors. In addition, Poland thinks that the text submitted by the Russian delegation before the meeting has a serious problem because it is written that the transition to a continuous UTC should be no earlier than 2040, but there is no final date, which could be 2040 or 2050. He repeated that Poland fully supports the resolution submitted by BIPM, and it is hoped that the General Conference will accept it.

Dr Thompson (UK) thanked Dr Dimarcq for the very clear explanation as to the importance of Draft Resolution D, and Dr Benedicto from the ESA, for an equally excellent presentation that emphasized the importance of this topic. He underlined that the implementation of different uncoordinated methods threatens the resilience of the synchronization capabilities that underpin critical national infrastructure. Continuity of UTC for the next century and a resilient global timescale is absolutely critical. He quoted Mr Salomon’s earlier comment that “the leap second process is a disaster.” Dr Thompson said that he was personally delighted that the UK government will be voting in support of Draft Resolution D.

Mr De Angelis (Italy) made a personal comment as a particle physicist and an astrophysicist: that the leap second is a contentious issue, especially in observatories. He described it as being a nightmare, because it is necessary to ensure that all telescopes are synchronized and that they know what the satellites are doing. For these reasons, Italy strongly supports Draft Resolution D.

Dr de Waal (Netherlands) said that the Netherlands supports Draft Resolution D, and in addition to Canada, also supports the suggested timescale in the proposal.

Mme Chambon (France) said that Dr Benedicto had summarized the risks very well. She insisted that the risk is high, and as mentioned by Dr Dimarcq and Mr Benedicto, there is a risk in the future of a negative leap second, and nobody knows what the consequences would be. She supported the proposal of Canada not to extend the deadline beyond 2030 because this work is urgent. France supports all the work done by the CCTF.

Dr Goldovsky (Israel) underlined the great and important scientific work on the preparation and drafting of Draft Resolution D. Numerous on-line meetings were held to discuss the problem of improving and further developing the international UTC scale as a unique, continuous, easily and universally accessible time standard for needs in various areas of industry, science, banking, digital technologies, and critical national infrastructures. The National Physical Laboratory of Israel participated in these discussions. The UTC international time scale is used by all NMIs and national laboratories as the only international standard by which local time scales are synchronized, which in turn synchronizes all national critical infrastructure. Many years of experience of introducing the "Leap second" to the UTC scale showed the shortcomings of this method of determining the UTC. The continuity of the scale is broken and many digital systems cannot correctly enter the leap second. Incorrect input of corrections that are not compatible with UTC into digital systems can lead to disruption of critical national infrastructure. The use of such special corrections is increasing despite their incompatibility with UTC and with each other. The use of these different *ad hoc* correction now presents a risk of failure of crucial national services, and further threatens the choice of UTC for many contemporary applications, including those needed for the digital transformation of financial and telecommunication services, energy transmission, navigation. In addition, it is not currently possible to predict the rate of the Earth rotation with sufficient accuracy. Recent observation of the Earth's rotation rate indicates an acceleration over the last 2 years, which could lead to the need for the first negative leap second - a phenomenon that had never been implemented previously. The Israeli delegation fully supports the UTC improvement scenario that consists of increasing the tolerance on the offset UT1 – UTC to an agreed fixed value that is reviewed in the future. The Delegation of Israel proposed to adopt Draft Resolution D.

The United States delegation said that it fully supported the resolution, as well as the proposal by Canada to have a speedy transition to this new system.

Draft Resolution E

Dr Dimarcq introduced Draft Resolution E "*On the future redefinition of the second*". He recalled that the second is the basis of six of the seven base units of the SI, except for the mole. The definition of the second left the realm of astronomy in 1967, to enter in the domain of quantum physics. The definition was "the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom." The definition was revised at the 26th meeting of the CGPM (2018) to "the second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium-133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}."

Dr Dimarcq recalled the presentation by Mr Salomon, which showed that the realization of the SI second with primary frequency standards has been continuously improved over decades. Since 2010, the caesium fountain uncertainty floor has been approximately 10^{-16} in terms of relative frequency uncertainty. Time metrology is now in the era of optical frequency metrology, with optical frequency standards reaching uncertainty levels two orders of magnitude better than caesium frequency standards.

The goals for the new definition of the second are to offer an improvement of at least one or two orders of magnitude of the realization of the new definition in the short term after the redefinition (reaching 10^{-17} to 10^{-18} relative frequency accuracy) and a larger improvement in the longer term. It will be essential to ensure continuity with the current definition and to ensure continuity and sustainability of the availability of the new SI second through TAI, and a significant improvement of the quality of TAI as soon as the definition is changed, with at least no degradation. The new definition must enable the dissemination of the unit towards a wide category of users and be acceptable by all NMIs and stakeholders.

Dr Dimarcq commented that the CCTF has updated the Roadmap towards the redefinition of the SI second. The work was carried out by a dedicated CCTF Task Force with 40 people in four specific Working Groups. A SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) analysis of the possible options for the new definition was undertaken. The options are: Option 1: single atomic transition; Option 2: ensemble of atomic transitions; Option 3: fixing the value of another fundamental constant. He said that Option 3 is not realistic today. However, it is an ideal option that could complete the consistency of the SI system, based on the fundamental constants. The Task Group has defined an ensemble of criteria and conditions to change the definition, with associated indicators to evaluate fulfilment levels. In addition, the Task Group has analysed possible schedule scenarios for the redefinition of the second. He gave an overview of the criteria and conditions to change the definition of the second and presented a diagram on the fulfilment level of mandatory criteria in 2022.

Dr Dimarcq presented the scenarios for the redefinition of the second. A redefinition at the 28th meeting of the CGPM (2026) is unrealistic as there is currently no consensus on the preferred option and there remains some important work to do in order to fulfil all the mandatory criteria. The 28th meeting of the CGPM (2026) could validate a roadmap towards a redefinition in 2030 if, in 2026, there is a consensus on the redefinition option to be chosen and if the work to fulfil mandatory criteria is likely to be achievable by 2030. If a redefinition is not possible in 2030, it will have to be postponed until the meeting of the CGPM in 2034 or 2038. However, this would require maintenance until the late 2030s of the operation of caesium fountain primary frequency standards that were built in the 1990s to 2000s. This would require the NMIs to continue to commit to operate this complicated system, to maintain the definition and the realization of the current definition of the second.

Dr Dimarcq concluded by saying that to ensure continuity between the current and the future definition, Draft Resolution E encourages the CIPM to promote the importance of achieving the objectives in the roadmap for the redefinition of the second, and to bring proposals to the 28th meeting of the CGPM (2026) for the choice of the preferred transition, or transitions, for a new definition of the second, and for the further steps that must be taken for a new definition to be adopted at the 29th meeting of the CGPM (2030). The Draft Resolution invites Member States to support research activities, and the development of national and international infrastructures, to allow progress towards the adoption of a new definition of the second. The latter is especially true for the infrastructure using optical fibres, because today these optical fibres have uncertainties at the level of 10^{-18}.

41. Report on liaison activities from the CTBTO

Mr Doury, Seismo-Acoustic Engineering Officer at the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) presented the major achievements of the organization. Article 1 of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty states that "*each State Party undertakes not to carry out any nuclear weapon test explosion or any other nuclear explosion, and to prohibit and prevent any such nuclear explosion at any place under its jurisdiction or control*."

He commented that since 1945 there have been more than 2 000 nuclear tests; since the treaty was opened for signature on 24 September 1996, there have only been 12 tests. In addition, since 2000 only one country has broken the moratorium on nuclear testing. The Preparatory Commission for the CTBTO is tasked with building up the verification regime and promoting the Treaty's universality.

He said that a verification regime is required to monitor compliance of the Member States with the treaty when it comes into force. The verification regime has four pillars. The first is the International Monitoring System (IMS), which is used to collect, analyse and distribute data from 337 monitoring facilities. The IMS consists of four monitoring technologies: seismic technology is used in 170 stations to listen for underground nuclear explosions; eleven hydroacoustic stations listen underwater; sixty infrasound stations are used to listen above ground; and eighty radionuclide technology stations are used to distinguish whether explosions are nuclear. A total of 90 % of the IMS facilities are already certified and operational. The network has proven to be effective, but it is not only used to detect nuclear tests, it is also used for civilian purposes to contribute to saving lives and to expand scientific knowledge. For example, the IMS data contributes to tsunami warning systems and to track the release of nuclear material in case of nuclear accidents, such as the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (Japan) in 2011. Data from the IMS network is made available to Member States and researchers who want to conduct research, for example on climate change.

Mr Doury explained that there is a need for metrology in the establishment of quality assurance for the IMS measurement systems. The CTBTO operates the four technologies described previously, which together ensure the means to provide forensic evidence in case of a nuclear test. The credibility of the CTBTO's data and measurement systems is absolutely essential. In order to achieve technical and scientific credibility, there are essential requirements for transparency, benchmarking, peer review, and a strong quality assurance system that needs to be operational through the full life of the CTBTO's measurement systems, so that it can be deployed for several decades at the stations.

The CTBTO has set some high-level objectives in order to achieve the desired level of credibility. First, it demonstrates the quality assurance in IMS measurements to ensure the trustworthiness and credibility of IMS data. The second objective is to ensure the consistency in IMS measurements and equivalence in data that are produced across the IMS network. The third objective is to ensure the continuity and transparency of best practices, regardless of any change in the instrumentation, service providers or individual personnel. Mr Doury said that in terms of quality assurance, the current state-of-play for the four technologies is that very good standards exist for the radionuclide technology and some processes such as proficiency testing are in place. In addition, there are CMCs that fully support the current need for particulate and noble gas technologies. The main challenge for the CTBTO is with the seismic, hydroacoustic and infrasound technologies: there is a need for validated CMCs across the IMS monitoring range. One additional challenge is that the measurement systems that the CTBTO deploys at its stations are often in very harsh and remote environments and cannot be returned to the laboratories for calibration. This means that traceability is required all the way to the station. This requirement brought the CTBTO closer to the metrology field and to the collaboration with the BIPM.

The BIPM invited the CTBTO to give some invited presentations to the Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV) for the first time in 2017, and it has taken part in the biannual meetings since then. In 2018 the CTBTO was invited to give a presentation to the 26th meeting of the CGPM, where it presented the IMS needs. Following the 26th CGPM, the BIPM and CTBTO identified common goals that provide the basis for a mutually-beneficial relationship. The CTBTO traceability needs were included in a strategy document drafted by the CCAUV and CCRI. In June 2021, the existing collaboration was formalized through the signature of a practical arrangement on collaboration on the metrological traceability of measurements of infrasound, seismic activity and radioactivity between the BIPM and the CTBTO, which made the CCAUV and CCRI

official liaisons of the CTBTO.

Mr Doury said that the next challenge is how to turn the strategy written by these consultative committees into projects and actual work. One challenge is how the metrology community can capture the low-frequency AUV needs. The EURAMET research project, InfraAUV 2020-2023, is capturing the needs that were expressed by the CTBTO. The ten participants in the project are a mix of NMIs and IMS service providers, which allows progress through the project to be very quickly fed through to the actual work. The objectives of the project are to extend the frequency range for traceable environmental measurements in the field of infrasound, underwater acoustics, and seismic vibration to lower frequencies. This can be done through the development of calibration methods, procedures for validation and dissemination, and on-site transfer to actual applications at measurement stations. The third objective is a challenge, in the sense of ensuring traceability right through to the stations. The project has required close collaboration between the CTBTO, seismo-acoustic experts and the CCAUV.

Mr Doury commented that in 2018 there were no validated CMCs for much of the infrasound monitoring range, which ranges from 0.02 hertz to 4 hertz; the InfraAUV 2020-2023 project captures this need and there is a particular focus on working with new instruments. Previously in the acoustic domain, it was necessary to measure static pressure, which was done through the use of barometers, audible sounds or low-frequency pressure variations that used microphones. There is a new focus on the use of micro-barometers to cover the IMS infrasound monitoring range, which is between static pressure and audible sound. Micro-barometers are different devices from microphones, which require new calibration methods so that they can be used as transfer standards. Calibration concepts are being developed, which are based on different principles. Several comparisons are already being organized through the InfraAUV project that demonstrate good agreement among the principles in the concept of calibration. This could result in CMCs being available quickly to cover the gap in the range that is currently missing. Another development is the plan to bring traceability to the site. This involves close cooperation with the InfraAUV project, whereby software is being developed by the CTBTO to provide calibration all the way through to the stations. Progress has been made to develop two new IEC standards since 2018. One of these was revised for primary microphone calibration by reciprocity, which was revised to lower frequency to cover the IMS infrasound monitoring range. The second is the creation of a new standard that allows alternate calibration methods that are better suited for infrasound, which do not involve reciprocity. The standard makes it possible to incorporate new methods that will make it easier to calibrate micro-barometers. He said that it is hoped that the first CMCs, which are currently in preparation, will be submitted to the BIPM in the near future.

Mr Doury said that a major outcome of the collaboration between the BIPM and the CTBTO is not just the development of CMCs and the progress made by the metrology community, but also all what can be learned from the metrology community in terms of the CTBTO and the community of organizations that work with the CTBTO. He recalled that there has been much progress with the IMS service providers to better understand concepts such as the International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) and the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). This improved understanding led, in 2021, to the first CTBTO comparison in the IMS infrasound monitoring range. The comparison involves five participants and was piloted by the Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE, France), which being an NMI, brought many of the methods needed for the comparison. The measurand is the pressure sensitivity from 0.01 hertz to 10 hertz, which is greater than the IMS infrasound monitoring range. The comparison included three different types of sensors: barometers, micro-barometers and microphones. This comparison marks the first time that the capability of IMS service providers has been formally assessed. The draft A report indicates that equivalence is demonstrated for the majority of the frequency range. The CTBTO is considering comparisons for its seismic technologies.

Mr Doury commented that part of the IMS seismic monitoring range is not covered by validated CMCs. This issue is being addressed by the InfraAUV project. One of the main challenges for seismic technology is that the current workbenches in the NMIs were built to support the calibration of accelerometers, which are lightweight instruments. Significant adaptations will be required to the workbenches to allow them to handle the seismic equipment. In addition, the InfraAUV project, the NMIs and the IMS service providers are developing methods to maintain traceability to the deployed seismic sensors when they are on-site.

There are currently no validated CMCs over the whole IMS hydroacoustic monitoring range. However, there has been significant progress on this technology with the development of the first calibration concepts that cover the full IMS monitoring range. On-site calibration of the hydroacoustic technology is a significant challenge, because the hydroacoustic stations are microphones that are deployed about one kilometre below the surface of the ocean in the Sound Fixing and Ranging (SOFAR) channel. Research is ongoing in this area with a close collaboration between the CTBTO, the CCAUV, and the InfraAUV project.

Mr Doury gave a summary of what can be expected in the future and from the collaboration with the BIPM. The progress and knowledge that has been gained from the collaboration with the metrology community will need to be disseminated to the whole CTBTO community: all the way through to the equipment operators who have the responsibility to calibrate the stations. The CTBTO will continue to collaborate with IMS service providers to address the need for traceability all the way to the stations. This is a challenge in terms of making this process operational, so that results of calibrations are described with the associated uncertainties. In addition there is a need to process the data and document it for reproducibility. This challenge needs to consider the digital transformation including the need to define formats to describe the results, to allow for reproducibility and to describe how to distribute the data. There is an additional challenge of developing sensors that are deployed in very harsh environments for their whole lifetime. This will include a requirement to better understand the sensors while they are in-service and the impact of the environment on sensor characteristics.

In conclusion, the metrological traceability for IMS measurements is key to further increasing the trust and to sustaining the credibility in IMS data in the long term. The CTBTO has raised awareness of these needs and there has been a strong response from the metrological community. The BIPM and the CTBTO are working on common goals and within a formal, practical arrangement, which is already proving to be a mutually beneficial relationship. The international metrological community has started to work on extending its measurement and calibration capabilities towards lower frequencies. Mr Doury finished by saying that with the current rate of progress, within a decade, it is hoped that most requirements will have been fulfilled for the seismic and the acoustic technologies.

The President thanked Mr Doury and invited comments.

Dr Milton said that there is a gap in the international community for very low-level radioactivity measurements that the NMIs could address with standards in the future. This is something that may need to be considered for the CCRI strategy and roadmap.

42. Report from the President of the CCAUV

Dr Laiz, President of the Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV) (*Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations*, CCAUV) presented his report on the activities of the CCAUV since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCAUV Executive summary

The CCAUV covers quantities in the field of Acoustics, Ultrasound and Vibration, all of which concern mechanical waves in various media (air, water and solids) and in structures (machine components, vehicles, buildings, and even human tissues and bodies). Although the measurement units that the CCAUV supports are not fundamental units of the International System of Units (SI), they have a direct relationship with public safety, health, and security as these phenomena are experienced in everyday life. Clear routes for future planning of the activities of the CCAUV have been identified through the strategic planning process, which revealed the importance and priority of acoustics, ultrasound and vibration (AUV) to its stakeholders.

Scope of the CCAUV

The remit of the CCAUV is to advise the CIPM on all scientific matters and issues that influence metrology in the fields of mechanical waves: acoustics (A), ultrasound and underwater acoustics (U) and vibration (V). It identifies and organizes key comparisons (KCs) in these four fields to establish global compatibility of measurements and traceability to the SI. The CCAUV also acts as the focus and network for this diverse community, to discuss the results of latest research to support emerging areas, and to develop common aims and collaboration between national metrology institutes (NMIs) and designated institutes (DIs) in Member States of the BIPM or with other relevant bodies.

Strategy

In 2021, the CCAUV reviewed its strategy to illustrate the present and future metrological needs for applications in AUV. The BIPM does not carry out any activities in these fields; as a result, the planning covers activities in NMIs, DIs and their stakeholders. The published CCAUV Strategic Planning document gives a detailed analysis of each separate discipline.

The CCAUV has reached the stage where repeats of KCs are being carried out in addition to considering new ones. The comparison phase within all four fields has matured and is dominated by repeats. Additionally, these repeat KCs are characterized by broadened scopes, spanning increased frequency ranges, which reflect the changing demands of users.

To achieve the highest efficiency and quality, the CCAUV is supported by its three Working Groups (WGs): the Working Group on Strategic Planning (CCAUV-SPWG) oversees revision of the CCAUV strategy and associated documents on a regular basis, it maintains a watching brief on developments and evolution in relevant scientific fields. The Working Group for RMO Coordination (CCAUV-RMOWG), among other things, works to resolve any obstacles to the inter-RMO review of calibration and measurement capabilities (CMC) and to harmonize intra-RMO CMC review processes. The Working Group for Key Comparisons (CCAUV-KCWG) reviews protocols, reports of international key comparisons and coordinates with the RMO KCs in order to assure the quality of published data.

The CCAUV follows developments in adjacent fields and applications, such as the work on the new definition of the kelvin and materials metrology in terms of acoustic wave propagation. It maintains close interaction with the Technical Committees of the International Electrotechnical Commission (IEC) and the International Organization for Standardization (ISO), both of which have liaison status within the Committee. With the signature of the MoU between the BIPM and the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) the CCAUV has a formal liaison with it concerning infrasound and low-frequency vibration traceability for its International Monitoring System (IMS).

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

The CCAUV has met twice since the 26th meeting of the CGPM (2018). The RMO TC-AUV chairs were invited to the CCAUV meetings, as well as to participate in the Key Comparison and Strategic Planning WG meetings.

Guidance documents are provided by the KCWG for carrying out KCs within the framework of the CCAUV.

The liaison with the CTBTO has been reinforced by dedicating one session of a CCAUV meeting to it. Experts from the CCAUV participate in CTBTO technical meetings.

A liaison between the joint WG ISO/TC 12 (Quantities and units) and IEC TC 25 (Quantities and units) has been formalized. This is the consequence of the strong collaboration between CCAUV and ISO TC12 (and IEC TC25) for the revision of the ISO 80000 series in 2018-2019.

Main activities and achievements

The CCAUV meets every two years. The group of metrologists within these areas represent a sparse and geographically-dispersed community. Therefore, in addition to covering cooperation via comparisons, CCAUV meetings also provide a global forum to describe the latest research and demonstrate progress in the relevant fields; they allow the creation and maintenance of contacts with other specialists; and they facilitate discussions on current issues. The meetings also provide an opportunity for scientific exchange and thematic presentations on current leading-edge AUV metrology topics.

The planning process for KCs involves careful deliberation to optimize resource requirements needed to respond to the needs of its stakeholders.

Some mature KCs have reached the stage where repeats of CC KCs, normally conducted on a 10-year cycle, are being carried out to assess them as well as to extend their calibration range. Long-term timetables and repetition periods were defined in the updated strategy document. The CCAUV has implemented the approach of limiting participation in CC KCs that use sequentially travelling standards. Typically, 10 to 15 (2 to 3 per RMO) participating laboratories take part in CC KCs for a period of 1 year.

National Scientific Centre “Institute of Metrology” (Ukraine) became an Observer of the CCAUV in 2022.

Challenges and difficulties

Contrary to many other Consultative Committees, the CCAUV does not maintain a base unit; the units that it uses are either derived (composed by several different base units) or represented by the dimensionless unit “decibel”. For this reason, there is a need in the AUV areas to provide traceable measurements in a wide range of units.

Although the redefinition of four SI base units does not have an immediate impact on AUV metrology, it will ensure that future requirements for increases in accuracy have been addressed. A coherent metric system among the mechanical and electro-magnetic quantities is indispensable for improving inertial sensors that are based on Microelectromechanical System (MEMS) calibrations.

Comparisons that are designed to accomplish traceability are carried out by circulating travelling standards, such as microphones, hydrophones or accelerometers, between participants. This unavoidable method of working in the AUV field is often time consuming, whereby the next participant must wait for the previous, and where the conservation of artefact quality can critically affect the outcome of a global comparison. Unfortunately, transport problems are regularly encountered

and are often exacerbated by national customs procedures. This can be particularly problematic for the sensitive and fragile instruments involved.

Outlook in the short and long term

Environment Monitoring

Future developments in the area of metrology for airborne sound (sound in air) can be grouped under four main headings within emerging technologies:

a) metrology infrastructure, sensors and instrumentation
b) hearing assessment and conservation
c) product and machinery noise
d) environmental noise assessment.

In all of these areas, the common denominator is the goal to better understand and mitigate the impact of noise on humans, and their environment.

Each line of development has a significant impact on the human population, industrial activities, industrial design, urban planning, health, safety, security, and environmental protection. There are several cases where the positive applications of sound and strategies for the mitigation of noise are intertwined. The benefits of environmental monitoring extend across all areas of society, from urban to rural populations.

A further aspect to be considered is the monitoring of highly dynamic events such as seismic activity and controlled explosions such as mining and demolition of man-made structures. Such events have an impact on the environment, and in some cases these sound sources may be of vital importance to global security. In this context, a subset of the environmental monitoring activities, which have applications to support the monitoring of the international treaties for banning nuclear testing, will require the establishment of acoustic traceability at very low frequencies.

Underwater acoustic techniques are chosen for most marine applications that require remote imaging, communication, or mapping in sea water. Techniques based on electromagnetic waves are not suitable for such applications because they suffer from a limited range due to high levels of absorption.

Another key driver for environmental monitoring is the concern over exposure of marine life to noise pollution. The impact of acoustic noise emanating from human activities poses unprecedented risks for the sustainability of key marine species, biodiversity, ecosystems and the overall health of the oceans. This increasing concern has led to the introduction of regulations requiring traceable measurements of noise.

Oceanic studies related to climate change use acoustics as a tool to probe the oceans, for example to monitor changes in temperature, acidification, detection of methane seepage, or to detect CO_2 leakage from sub-seabed Carbon Capture and Storage (CCS) sites.

Medical and diagnostics

Medical and diagnostic applications span all stages of life, from birth (in the form of neonatal screening) into old age (hearing conservation).

Hearing impairment can lead to severe degradation of the quality of life. Hearing loss can lead to social isolation, family tensions and employment challenges for adults. In children, it can affect communication ability, literacy, educational achievement, as well as social and psychological development. Consequently, national healthcare programmes invest heavily in both hearing diagnostics (through screening programmes) and rehabilitation (hearing aids).

The metrological underpinning of ‘objective audiology’ is a vital prerequisite for the extended use of this technology, which has the potential to become the standard diagnostic technology for audiology in the future. Improved methods for the determination of reference values of the ear with regard to hearing thresholds requires new calibration methods that are traceable to national standards and the investigation of the relationship to behavioural hearing thresholds, which have to be determined for new earphones.

Concerning therapy and diagnostics, ultrasound is the second most commonly used imaging technique in medicine after x-rays. There are 250 000 diagnostic ultrasound instruments world-wide and 250 million examinations are performed each year. In the developed world, most foetuses will be the subject of at least two obstetric examinations during normal pregnancy. Safety-sensitive diagnostic applications will drive the continued development of improved metrological tools and prediction models. A number of these applications involve generating higher acoustic output.

Novel therapeutic applications of ultrasound will continue to emerge, supporting drug delivery concepts based on high-power ultrasound or cavitation and more extensive use of High Intensity Focused Ultrasound (HIFU) or High Intensity Therapeutic Ultrasound (HITU). Exploitation of the clinical potential of these methods requires the development of metrology for both existing and emerging dosimetric quantities. To unlock the potential of therapeutic ultrasound and to better assess safety in diagnostic applications, metrology is essential for the development and validation of methods to determine ultrasound dose.

Key factors in assessing the safety of medical ultrasound applications lie in methods of estimating *in vivo* ultrasound levels, and its implications in terms of bio-effects. The ability to make such measurements is likely to find increasing application, for example in the evaluation of protein solutions, or assessment of nanoparticles.

Engineering and production

Sensors, and the instrumentation used to produce meaningful outputs from sensors, underpin all acoustic measurements, starting with the realization and dissemination of the primary standard and finishing with hearing assessment, noise measurement or a description of sound quality. In many cases, the drivers for developments in acoustic instrumentation can be addressed through innovation in sensors and instrumentation. In this respect there is great potential to exploit synergies with the consumer product sector, where the demand for microphones now exceeds 2 billion units each year. With the proliferation of low-cost sensors, there is now scope for active management of the acoustic performance of sophisticated items and wireless, autonomous and intelligent operation. For example, condition monitoring of machinery, vehicles, rail infrastructure and even domestic appliances could be implemented to maintain the acoustic performance designed into products, optimizing operating efficiency or simply monitoring the level of noise produced. These applications demand new metrological techniques, such as remote self-calibration of sensors and sensor networks, acoustic signature recognition and decision making based on multiple parameters.

Industrial applications of ultrasound are extensive, where it is commonly applied as a means of bringing about macroscopic changes in materials, either within the bulk or at surfaces. Ultrasonic cleaning is the most widespread application of industrial ultrasound, and such technology is used for the cleaning of surgical and dental instruments. There is a need for broadband measurement methods capable of spatially resolving non-uniformities in acoustic field distributions, and to underpin improved understanding of influencing factors. This will enable high-power ultrasound to be further applied in an economically viable way in a wide range of technical fields in industries such as food (crystallization control, pasteurization), pharmaceuticals (particle size control) and biofuel production.

The emerging metrological activity in the field of dynamic measurement of mechanical quantities, like force and torque, has revealed a whole new area where linear and angular acceleration become base quantities for traceability of the derived quantities. One well known area is automotive crash testing for which dynamic measurements are essential. Although widely accepted international standards exist, the results are in many cases not strictly comparable due to the lack of appropriate calibrations and an in-depth understanding of the dynamic metrology. The metrology infrastructure currently in place for dynamic mechanical quantities, namely vibration and shock, lags a long way behind that established for acceleration measurements.

Emerging applications in MEMS sensors

Requirements for traceability in shock acceleration measurements are generated in research, industry, medicine and the military. The challenge is to cover the wide range of applications with a small number of efficient methods and calibration techniques. MEMS accelerometers made their debut in the automotive applications of crash sensing and airbag control. Here, the accelerometer continuously measures acceleration of the car. The acceleration curve is integrated to determine if a large change in velocity has occurred and, if it exceeds a predetermined threshold, the airbag is fired. The decision to fire the airbags must be made in the order of milliseconds, yet the operation must be extremely reliable since errors can result in loss of life and limb. Automotive applications for accelerometers also include vehicle dynamic control, rollover detection, antitheft systems, electronic parking brake systems, and vehicle navigation systems. Since human life is at stake if these systems malfunction, the accelerometers are tested and calibrated, as well as undergoing extensive reliability testing.

The development of autonomous vehicles is advancing rapidly. As of 2018 no fully autonomous cars were yet permitted on public roads. Accelerometer specifications for inertial guidance of an autonomous vehicle will be the strictest compared to the other applications discussed above, since in the event that a GPS signal is lost, the position of the vehicle must be determined by the inertial guidance system over a period of time that might span tens of minutes. The current designs for capacitive MEMS-based accelerometers and gyroscopes may never meet requirements for fully autonomous driving and may have to move towards optical-based systems instead of capacitive-based systems.

Society and Occupational Safety

Noise produced by a variety of sources such as transportation (road, rail, air), industrial plant and wind farms, neighbourhood noise, sports and entertainment venues, is detrimental to the environment and quality of life.

Requirements for traceability and mutual recognition of measurement results are needed for workers' safety. The human response to mechanical vibration, where a dose concept is applied, represents one issue, and hearing is commonly put at risk from excessive exposure to man-made noise. Measures to reduce these hazards impose huge expenses annually. The widespread screening of work-force or personal noise dose-monitoring will demand new approaches and innovative instrumentation.

Low-frequency vibration transducers are widely used for monitoring earthquakes. The demand for earthquake monitoring systems has increased following a number of major seismic incidents. Special sensors provide traceability to thousands of seismometers and hundreds of observation stations in the Global Seismographic Network, which provide an immediate alert to the population, demanding calibrations at ultra-low-frequencies.

The digital agenda

Test data sets for validating learning data and for an investigation of performance are required. The challenges in this area are to calibrate digital instruments containing sensors embedded with digital signal processing systems, with examples such as marine autonomous recorders where the hydrophone sensor is contained within a digital system, which includes digital signal processing stages. The proliferation of networks of sensors and artificial intelligence will require new metrological evaluation strategies.

CCAUV Data

CCAUV set up in 1998
President: H. Laiz
Executive secretary: G. Panfilo
Membership: 18 members, three liaison and 13 observers
List of CCAUV members and observers: https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccauv/members
Meetings since the 26th CGPM meeting: 16-18 November 2021, 26-27 September 2019
Full reports of the CCAUV meetings: https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccauv/publications
Three Working Groups: https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccauv

- Key Comparisons (CCAUV-KCWG)
- RMO Coordination (CCAUV-RMOWG)
- Strategic Planning (CCAUV-SPWG)

CCAUV Comparison activity	Completed	In progress	Planned
CCAUV key comparisons (and supplementary comparisons)	18	2	17
RMO key comparisons (and supplementary comparisons)	40	12	-
BIPM comparisons	0	0	0
CC pilot studies	4	0	0
CMCs	1 294 CMCs in 51 service categories registered in the KCDB		

43. Report from the Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM (JCRB)

Dr Olthoff, CIPM representative to the JCRB, said that the JCRB has the role of ensuring that the CIPM MRA works well through the representatives of the RMOs and the BIPM that attend meetings of the JCRB. In early November 2022, there were 25 963 CMCs registered in the CIPM MRA key comparison database (KCDB) and 1799 key and supplementary comparisons. From 2019 to 2022, more than 1 000 new CMCs and more than 50 new comparisons have been added each year. In addition, every region's quality review process is assessed by the JCRB annually. He commented that more than 20 years after the formation of the CIPM MRA, it is still a very active process, and one that operates very well.

Dr Olthoff said that one of the biggest changes since 2018 has been the inclusion of GULFMET into the JCRB. The NMIs of GULFMET worked very hard to meet the requirements to join the JCRB, and they should be congratulated for the progress that they have made over the course of time. In 2021, the JCRB recommended to the CIPM to admit GULFMET as a full member of the JCRB, with a voice and the right to vote. The CIPM agreed to the recommendation and GULFMET was admitted according to Decision CIPM/110-13.

He recalled that the JCRB had to adjust in order to operate during the Covid-19 pandemic. JCRB meetings were successfully organized on-line, as either hybrid or fully-virtual meetings, with all RMOs represented at all meetings. In a few cases, it was necessary for the JCRB to approve extensions for RMO-approved quality management systems, where some quality systems could not be re-approved within the five-year time limit, due to Covid-19 pandemic issues. This situation did not happen often because the RMOs developed hybrid tools to organize the peer review of quality management systems of member institutes in order to ensure that the systems were assessed, in most cases, in a timely way.

Dr Olthoff said that there has been a significant amount of work carried out to improve the implementation of the CIPM MRA since 2018. He noted that the revisions of ISO/IEC 17025 and ISO 17034 ensured that all NMIs and DIs declaring CMCs within the CIPM MRA demonstrated conformance of their quality management systems to the revised standards. This activity required a considerable amount of work by the NMIs and by the JCRB. The JCRB welcomed the efforts by the BIPM in realizing the Capacity Building and Knowledge Transfer (CBKT) programme. It was recognized that the focus of that programme on the operation of the CIPM MRA and the fundamental functioning of the KCDB and the CMC approval process was very useful in order for the CIPM MRA to be accessible, and for inclusion and participation in the CIPM MRA to be more easily accomplished by different countries.

The KCDB 2.0 was launched in 2019, and the old system was shut down in 2021. All CMCs are now processed through the new system. Analysis carried out in 2022 confirmed that efforts undertaken to increase the effectiveness of CIPM MRA activities succeeded in terms of reduced review times, which have been cut from 140 days to less than 100 days. In 2021 the BIPM, along with considerable effort from the RMOs, rewrote and revised the documents that describe the functioning of the CIPM MRA. The result is a set of more coherent single documents which make it easier to understand how the CIPM MRA functions. In 2022, the CIPM MRA brochures were published in three different languages, making accessibility a priority.

The President thanked Dr Olthoff.

44. Report from the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM)

Prof. Neyezhmakov, CIPM representative to the JCGM, gave the following statement:

"*Using the privilege of a member of CIPM to be in person in the general conference, I want to send all of you, distinguished members of the delegation of Member States and Associate members of CGPM, a very important message: The metrological system of Ukraine is operating and fulfils its main function, protection of citizens and national economy from the consequence of erroneous measurement results. From the very first day of the war, I received an impressive number of letters expressing your sympathy and concern. Many thanks for this, as well as for the opportunity to work in your institutes, for those Ukrainian women metrologists who are avoiding the horrors of this war, for their children, who end up in your countries. I am very grateful for the statements made at the opening of the meeting by several delegations. Please accept my deepest gratitude for helping Ukraine*."

Prof. Neyezhmakov recalled that metrology is the science of measurement and its application and deals with many concepts and definitions. It is important that stakeholders in metrology use the same language, and that measurement results are unambiguously understood and interpreted. To address this issue, the JCGM was established. Its membership consists of eight organizations: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, OIML, IUPAC and IUPAP. The task of JCGM is to maintain and promote the use of the International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) and the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). The JCGM works through two working groups: The JCGM Working Group on the Expression of Uncertainty in Measurement (JCGM-WG1:GUM), which is responsible for the GUM and JCGM Working Group on the International Vocabulary of Metrology (JCGM-WG2:VIM), which is responsible for the VIM.

The principles of the GUM are used world-wide and to adapt effectively to the rapidly changing world, it was decided to update the GUM Guidance documents. For example, "JCGM GUM-6:2020 Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models" was published in December 2020. This is the first document published as a part of the GUM "new perspective". Development of the other GUM supplements is in progress, according to a roadmap. In addition, JCGM-WG1:GUM has started studying measurement uncertainty in the context of the SI digital framework, digital calibration certificates and web ontology language.

JCGM-WG1:GUM and the World Meteorological Organization (WMO) held a joint workshop on "Measurement uncertainty in meteorology and climatology" on 5-6 April 2022. The workshop contributed to enhancing cooperation between the JCGM-WG1 and the WMO Expert Team on Measurement Uncertainty (ET-MU). The aims of the workshop were to recognize the current level of the convergence in the field of measurement uncertainty, to identify the outstanding tasks and how to address them.

The International Vocabulary of Metrology (VIM) is a guidance document that aims to disseminate scientific and technological knowledge about metrology by harmonizing the related fundamental terminology. The year 2021 was a landmark for WG2 with the circulation of the VIM4 1CD and the organization of a webinar, that allowed wider engagement and consultation with the stakeholders and broader metrology community. The webinar focused on the new structure and significant changes in the VIM4. Each new edition of the VIM has represented an opportunity to revise and improve its structure. This has been the case with the VIM4, which includes a new chapter on nominal properties and examinations. Over 1 700 comments were received on the VIM4 1CD. Due to the lengthy consultation period and large number of comments received following the circulation of the VIM4 1CD, it was agreed to send out at least one more CD (VIM4 2CD) for comment.

One of the main outstanding issues with the VIM4 is its aspiration for machine-readable definitions. To this end, the CCU Working Group on Core Metrological Terms (CCU-WG-CMT) was established and was requested to identify core metrological terms in the context of machine readability of these terms. The CCU-WG-CMT works with experts from the fields of mathematics, linguistics and semantics and members of the CIPM Task Group on the Digital SI (CIPM-TG-DSI) and Expert Group, CODATA and VIM committees. The conclusion from the experts is that the whole process of developing machine-readable and machine-actionable definitions of CMTs needs more time because of the complexity of the task. The goal is to reach machine-readable, executable and machine-interpretable content of documents. The ultimate goal is to allow a machine to take decisions without human intervention.

The President thanked Prof. Neyezhmakov.

Sixth session – 18 November 2022 (morning)

The President of the CGPM welcomed the delegates to the sixth session.

45. Implementing the new SI (breaking the invisible chain)

Dr Stephan Schlamminger, NIST (USA) said that in 2018 the international mass scale was in chains. It was weighed down by the single definition of the one point, the kilogram. This situation was changed by a vote at the 26th meeting of the CGPM (2018). The vote changed the whole underpinning of the International System of Units. He posed the question: what is the advantage of having made this change? Instead of memorizing seven "recipes" for seven base units, it is now possible to simply memorize seven units; seven fundamental constants. Previously some of these "recipes" had long definitions; some were idiosyncratic definitions and at least one had a long and idiosyncratic definition. It is no longer required to memorize the "recipes" because the system has been made as simple as possible but not simpler; there is a beauty in its simplicity.

Four of these seven constants are fundamental constants: the Planck constant, elementary charge, the Avogadro constant and the Boltzmann constant. The fundamental constants have several important properties. One property is already given away in the name; they are constant. This means they have the same value at every time, everywhere in the universe. This is not a trivial fact and the important conclusion from this is that the fundamental constants are the same at every scale.

Dr Schlamminger gave an example. If light is used, for example to measure distances, there is no difference when measuring a big distance like the distance from the earth to the moon or a small distance like a distance on a microchip: the speed of light remains the same. Light travels about 300 million metres per second. It takes one second to travel from the earth to the moon, whereas it takes about an attosecond (10^{-18} seconds) to go from one feature of a microchip to the next one, but it is the same fundamental constant used to measure the distance.

He said that the mass scale, similar to length, is enormous. The heaviest body weighed by humans is a black hole that was created by the merger of two other black holes and had a total mass of 142 solar masses or about 3×10^{32} kg. The smallest mass measured is a neutrino at about 3×10^{-28} kg. This entire scale spans 60 orders of magnitude, and previously there was one point where the scale was anchored, and this was at the kilogram point. Humans could only measure a small range by subdividing or multiplying the kilogram. Before 2018, small masses were routinely measured in electron volts and they could not be converted into kilograms without error and uncertainties, because it was not possible to extend the mass scale without these errors and uncertainties. In the revised SI it is possible to measure all these masses in kilograms without a conversion error. The revised SI makes it possible to measure subatomic masses through to astronomical masses in one unit. He added that as well as being scalable, the fundamental constants are universal and Max Planck had envisaged in 1899 a unit system that can be used for all civilizations, including extra-terrestrial and non-human. This system is now a reality.

Dr Schlamminger gave an example of the traceability chain for weights. If a person wants to send a package in the mail, they take the package to the Post Office, where it is weighed and a price is given for shipping the package. How does the Post Office determine the mass of the package? There is a chain that links down from the BIPM, where the International Prototype of the Kilogram (IPK) was housed and was taken out of the vault every 50 years or so for a calibration campaign. The measurement

was transferred to one of the NMIs, each one of which has their own national prototype. Within each country there is a dissemination chain, so for example in the USA, all 50 states have an office of weights and measures. These offices get the mass and then from there it is transferred down the chain to each Post Office. He commented that Post Offices represent a very small part of the whole economy, so at this bottom tier, there are millions of weights. The situation is analogous to a true pyramid, and similar to ancient Egypt, when the pyramids were built, the stonemasons used yardsticks which had to be calibrated against the master yardstick. He said that 4 000 years later the same dissemination chain is still in place whereby it is necessary to go back and compare against a standard. The revision of the SI made this chain disappear. This change has overcome the problem of the uncertainty going up with progression down the chain, for example the measurement at the Post Office is not as good as the measurement at the BIPM.

Metrologists are now working on the next generation of Kibble balances, which were previously about the size of a car. They were built to measure 1 kg masses and were very complicated. The next stage in development are tabletop Kibble balances that can measure weights from about one milligram to 50 grams. They can be used on the factory floor to measure, for example, the production of pharmaceuticals. These Kibble balances eliminate two chains: one is the chain that links back to the BIPM and the other is the chain needed to disseminate the kilogram down to small values. The situation is not however quite so straightforward. One simple measurement, the measurement of mass, has been exchanged for two electrical measurements. It is now required to measure voltage and impedance. This may seem more complicated, but both of these quantities, voltage and impedance, can be measured with volume effects. Since volume counts the same everywhere in the world, it is possible to make a measurement everywhere in the world without having a chain. It is possible to create the unit of voltage and the unit of resistance, as long as there are people with the right expertise and the right equipment. Kibble balances are mainly used for larger masses and for smaller masses of less than one gram, the electrostatic force balance is the preferred option.

Dr Schlamminger said that mass is not the only mechanical unit that can be measured using the new system of units. In countries where the unit of torque is the foot-pound, for example the USA, it is cumbersome to measure because ten mass pieces are needed in order to make a pound with a metric mass set and each individual mass piece has to be measured. The solution is that it is now possible to measure torque using Kibble balance principles. The principle is similar to a normal Kibble balance, where there is a linear motion of the coil. To measure torque there is a rotary motion of the coil, which provides a continuous calibration. It is no longer necessary to go to discreet points for example 1 foot-pound and 2 foot-pounds, it is possible to have a continuous spectrum. An additional advantage is that the measurements are almost instantaneous. A team in Japan is developing a dynamic torque balance that can measure torque directly on the shaft of rotating machinery, for example a wind turbine.

The units previously mentioned come under the umbrella of the Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM), however even outside the CCM, this technology has effects, for example, the becquerel. In order to measure the massic activity of a volatile radioactive compound, for example a compound that is used for cancer treatment, it is necessary to measure mass and the activity very quickly because the substance evaporates. Another advantage is that using this technology eliminates the need to be close to the radioactive substance. Using an electrostatic force balance to measure the massic activity of a volatile radioactive compound allows the user to make the measurement at a safe distance and provides traceability.

Another example is measurement of optical radiation using a laser power balance to measure the power of a high-power laser. In the past this was achieved by aiming the laser against a water tank and measuring how quickly the water in the tank increases in temperature. However, this destroys the laser beam and it is no longer available to be used for its intended purpose. A laser power balance bounces the laser beam off of a

mirror that is mounted in an electrostatic balance, the beam can be guided to where it has to go and the power of the laser can be measured *in situ*. Dr Schlamminger said that the laser power balance is a link back to the earlier part of his presentation. When he presented the mass scale and mentioned the mass of the black hole, this was achieved using the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO), which can have its laser power measured using the laser power balance.

He concluded by saying that metrology is science by the people for the people. The new SI affects all the countries represented at the General Conference. The delegates at the 26th meeting of the CGPM (2018) voted to democratize measurement. When the kilogram was locked in a vault, which required three keys to open it, only a select few had access to the mass unit. Now the mass units are available to every man and every woman on the planet; the SI has been democratized. He said that just as "open hardware" has changed the world, for example the openflexure microscope, which is now used in sub-Saharan Africa to diagnose malaria and other infectious diseases, the concept of "open metrology" can be a very powerful idea. The citizen metrologist that has access to all the units will help achieve and measure the achievement of the sustainable development goals that have been adopted by all member states of the United Nations.

The President thanked Dr Schlamminger and opened the floor for questions.

Dr Härtig (Germany) asked when tabletop Kibble balances are likely to become available. Dr Schlamminger replied that this development will take a long time and that in 20 years' time, it may be possible to have the quantum standards in a small tabletop device. He added that it is necessary to dream big in order to achieve something.

Dr Milton recalled that Dr Schlamminger had written an interesting paper[34] earlier in 2022 about whether the kilogram definition was implemented in terms of an inertial mass or a gravitational mass. He said that his hope was that this paper would trigger some thinking on this subject. He asked Dr Schlamminger to comment on this in relation to the slide that displayed the mass of a black hole all the way down to a difference in neutrino masses. He also asked him to reflect on whether an inertial mass or a gravitational mass has been defined. Dr Schlamminger replied that in the previous definition, where the kilogram and the IPK were used, it was the weight that was used and this is gravitational mass. With the Kibble balance, it is an inertial mass. Some of the measurements in the astronomical realm use inertial mass. The mass is not perfect yet; for astronomical masses, Big G must be known in order to convert it back into kilograms.

46. Report from the President of the CCM

Dr Richard, President of the Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) (*Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées*, CCM) presented his report on the activities of the CCM since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCM Executive summary

The CCM has active technical working groups that span the following diverse areas of metrology: mass, density and viscosity, force and torque, pressure and vacuum, fluid flow, hardness and gravitational acceleration. The CCM Working Group on Strategy and MRA coordination seeks to provide guidance on coordinating and harmonizing the working group activities.

[34] G Mana and S Schlamminger, The kilogram: inertial or gravitational mass?, 2022, *Metrologia*, **59**, 043001 https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac7ca7

Much of the present activity of the CCM is focused on the realization and the dissemination of the new definition of the kilogram by following a detailed note[35] developed to manage this work.

However, not all the working groups are affected by this change and instead are concerned with the improvement of existing technical capabilities or the development of new capabilities.

Scope of the CCM

Present activities concern matters related to the realization and dissemination of the mass unit following the 2019 redefinition of the kilogram in terms of the Planck constant, establishment of international equivalence between national laboratories for mass and a number of related quantities (density, pressure, force, fluid flow, viscosity, hardness, gravitational acceleration) and advice to the CIPM on these matters.

Strategy

A completely revised CCM Strategy was prepared by the Working Group on Strategy and MRA coordination (WGS) in 2021. The strategy document 2022-2032 was approved by the CCM by correspondence in March 2022 and is available on the CCM website.

The strategy document presents an overview of major scientific, economic and social challenges which can be addressed by measurements of mass and related quantities for seven challenge areas identified by the CIPM in response to evolving needs in metrology. The revision of the SI in May 2019 enables the realization of the unit of mass and some related quantities directly from fundamental constants. Measurements directly traceable to the SI, dynamic measurements and measurements with a wider range and under wider conditions are the main topics for investigation over the next decade.

The CCM has set three strategic aims for the 2022-2032 period. The strategy foresees contributions to progressing measurement science across all technical areas covered by the CCM. To support global comparability of measurements, managing the transition from an internationally coordinated kilogram dissemination to the use of individual sovereign realizations remains the main focus. The CCM will continue to implement the CIPM MRA by efficiently organizing key comparisons and coordinating RMO key and supplementary comparisons. The CCM will support the introduction of the SI digital framework in mass related metrology. The CCM aims to facilitate stakeholder engagement and knowledge transfer by continuing the organization of workshops and initiating webinars and to seek extended collaborations with other Consultative Committees and involvement of external bodies.

The CCM oversees the work programme of the BIPM mass laboratories.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities and achievements

Two CCM meetings were held during the period 2019-2022, one on 16-17 May 2019 and one on 20-21 May 2021. The meeting reports and the majority of the presentations/working documents are publicly available on the CCM webpages. A workshop on new activities and developments in mass and related quantities was organized during the meeting in 2019. The meeting in 2021 was exceptionally held on-line due to travel restrictions. The detailed note on the phases for the dissemination of the kilogram prepared by the Task Group on the Phases for the Dissemination of the kilogram following redefinition (TGPfD-kg) was approved and the progress of the tasks following the detailed note was reviewed during these meetings. Other major decisions of these two meetings include:

[35] Detailed note on the dissemination process after the redefinition of the kilogram CCM, available on the CCM webpages. https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm

- merging of the Working Group on Realization of the kilogram and of the Working Group on Dissemination of the kilogram into a single Working Group on Mass (WGM).
- appointment/re-appointment of the chairs and vice-chairs of the CCM Working groups.
- revision of the Terms of Reference of the Working Group on Gravimetry and of the TGPfD-kg to better reflect the activities undertaken and the issues addressed within the groups.
- formulation of a CCM request to the JCRB about the possibility of adding an explanatory note for clarifications on "Appendix A1 in CIPM-MRA-P11".

INMETRO (Brazil) and IPQ (Portugal) became CCM Members in 2019. CMS/ITRI (Chinese Taipei) and NSC IM (Ukraine) became CCM Observers in 2021.

Regarding the realization and dissemination of the new definition of the kilogram, the first key comparison of realization experiments CCM.M-K8 was completed in 2019. The BIPM compared realizations of the kilogram based on five Kibble balances and two applications of the X-ray crystal density (XRCD) method and the results of this, together with those of a previous Pilot Study, were used to calculate the first Consensus Value for the kilogram. Mass values based on the Consensus Value were 2 μg smaller than those based on the IPK, with a standard uncertainty of 20 μg. The dissemination of the kilogram entered Phase 2[36] on 1 February 2021, where the Consensus Value is used as an "international mean kilogram". Since the change between mass values based on the previous traceability and the new values is small compared to the uncertainty, no adjustment to the international mass scale was required. However, adjustments to the published Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) of 31 NMIs were necessary to take into account the uncertainty in the Consensus Value. The BIPM prepared a note providing information on the impact of the redefinition of the kilogram on mass calibration uncertainties stated on BIPM calibration certificates that were issued before 20 May 2019. The note was sent to all previous customers. A paper "Beginning of a new phase of the dissemination of the kilogram" written by the chairs of the WGM and the TGPfD-kg and the BIPM was published in *Metrologia* in 2021.

The second key comparison of kilogram realizations was launched in late 2021. There were seven participants in the first comparison and nine in the second. The mass comparisons of the transfer standards with respect to the BIPM working standards are complete. The draft A report is being circulated. The result of the comparison will contribute to the calculation of a new Consensus Value.

A completely revised CCM Strategy 2022-2032 was produced by the CCM-WGS. The WGS also establishes annual CCM action plans and monitors their progress. Regarding the CIPM MRA, the CCM provided comments to the updated CIPM MRA Guideline documents. Additionally, the CCM has identified its specific needs and contributed to the implementation of the KCDB 2.0 platform and the new BIPM website. The approval process for comparison reports has been simplified to accelerate the publication of comparisons results. Two CCM Guidance documents, the "CCM Guidelines for approval and publication of the final reports of key and supplementary comparisons" and the "CCM Key Comparison Report Template" have been revised to take into account these changes. For the Comparison Report Template, the chapter dealing with transfer standards was improved. The format of the core text and examples were also refined for better readability. Specific guidance documents for an "efficient and effective" approach to CMC review exercises have been established in some WGs and are being developed in others. The CCM is working with RMOs and NMIs on reducing the number of CMCs following the recommendations of the CIPM MRA review.

[36] Transition period where mass dissemination is based on a Consensus value calculated from the results of three comparisons of realization experiments.

Challenges and difficulties

The revision of the SI and the associated redefinition of the kilogram in May 2019 represented a step change in the way the SI unit of mass is defined, maintained and disseminated at the NMI level. While the development of the realization experiments reached a level of uncertainty and equivalence which was acceptable to allow the redefinition of the unit of mass in 2019, work is needed to improve the number and reliability of the experiments and the degree of equivalence. The most critical issue for the CCM is to manage the dissemination phase from the Consensus Value as requested by CCM Recommendation G1 (2017), and its transition to the dissemination from individual realizations. There are a number of technical issues that must be addressed such as the computation of the Consensus Value and reducing the dispersion in realization experiments.

The CCM covers a very diverse range of measurements. The technologies applied to the measurements in these areas vary greatly, as do the scientific and industrial areas which rely on these measurements. Adding the diversity of the mass related measurement area to the fact that the measurement of dynamic quantities is becoming increasingly important in a number of these areas means that the scope for end-user benefit can potentially be very wide and a strategy to maximize the impact will need to focus on areas where the benefits can be most effectively exploited.

Other more routine difficulties must also be addressed continually. These include improving the efficiency of the CMC review process and minimizing delays in carrying out key comparisons and reporting their results.

Outlook in the short and long term

By the end of 2023 the CCM will have held its 19th meeting (25-26 May 2023), preceded by meetings earlier that week of most of its Working Groups, including the Working Group on Strategy and MRA coordination. The major goals of the CCM meeting are:

- review of the dissemination process of the kilogram including the results of the second key comparison of realizations of the kilogram CCM.M-K8, and the calculation and use of the second Consensus Value.
- review and approval of the protocol for the third key comparison of realizations of the kilogram.
- appointment/re-appointment of all WG chairs and vice-chairs.

As with previous meetings, each CCM member will be asked to prepare a written report of relevant scientific activities. A workshop dedicated to new activities and developments in the areas of metrology that are of interest to the CCM will be organized.

By the end of 2024 the CCM expects to complete the third key comparison of realizations of the kilogram, and to compute the third Consensus Value for the dissemination of the mass unit.

In the long term, from 2024 and beyond, the CCM expects to improve its view of the status of realization experiments and to strengthen the infrastructure to facilitate the achievement of the following goals:

- Reducing the dispersions in realizations of the kilogram.
- Managing the dissemination phase from the Consensus Value and the transition to dissemination from individual realizations of the kilogram.
- Ensuring that a sufficient number of primary realizations of the unit of mass are always available and if possible, in each region.

- Development of less expensive and more easily operated apparatus (also those based on new ideas, alternative to Kibble balance and XRCD routes) to realize the kilogram in terms of the Planck constant for use by the NMIs.
- Development of commercial instruments for the realization of the kilogram and its submultiples for use at NMIs in the short term, and by a widening range of end users in the longer term.
- Continuing the development of technical and scientific activities in the CCM Working Groups according to the CCM Strategy and the Working Group action plans.

CCM Data

CCM set up in 1980

President:	P. Richard
Executive Secretary:	H. Fang
Membership:	25 members and six observers
List of CCM members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	16-17 May 2019, 20-21 May 2021
Full reports of the CCM meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm/publications
Eight Working Groups:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm

- Strategy and MRA coordination (WGS)
- Mass (WGM)
- Density and Viscosity (WGDV)
- Force and Torque (WGFT)
- Pressure and Vacuum (WGPV)
- Fluid Flow (WGFF)
- Hardness (WGH)
- Gravimetry (WGG)

CCM Comparison activity	Completed	In progress	Planned
CCM key comparisons (and supplementary comparisons)	98	13	4
BIPM comparisons	0	0	0
CC pilot studies	4	2	0
CMCs	2 965 CMCs in 29 service categories registered in the KCDB		

47. Metrology for future sustainable energy networks

Dr Sonja Berlijn, Professor of Sustainable Integrated Energy Systems, KTH Royal Institute of Technology (Sweden) said that her presentation would explain why metrology is of vital importance for energy transition and energy networks and noted that future sustainable energy networks should take into account all 17 of the United Nations Sustainable Development Goals.

Dr Berlijn noted that there are many targets to achieve net-zero emissions by 2050 and cited a few examples. The European Green Deal is an initiative with the goal of making Europe the first

climate-neutral continent by 2050 through boosting the economy, improving people's health and quality of life, caring for nature and leaving no one behind. REPowerEU is about rapidly reducing dependence on Russian fossil fuels by fast forwarding the clean transition and joining forces to achieve a more resilient energy system and a true Energy Union. In addition, the USA has implemented the Inflation Reduction Act with a US$ 369 billion investment in Energy Security and Climate Change, Japan has the Green Transformation initiative and the Republic of Korea, China and India have ambitious clean energy targets.

Dr Berlijn said that meeting the target is possible; the technologies are ready and it will cost less than 0.5 % of GDP. Some industries will be very difficult to decarbonize, for example heavy industries such as steel and plastic production, and heavy-duty transport such as shipping and the airline industry. There are a number of routes that can be taken to achieve decarbonization. These include electrification, using hydrogen, bio fuels, and carbon capture and storage (CCS) technologies. Pursuing these initiatives will have an associated increase in electricity demand; it will increase by a factor of four to six in Europe and by a factor of seven globally. The increased demand for electricity to make this transition will require an increase in transmission and storage.

The International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022[37] presented a report about how the decarbonization of energy markets will happen and the report anticipates an increase in generation by a factor of seven. Over the last 20 years Europe has been able to increase its generation capacity by 30 %. It will be necessary to increase this generation capacity by 300 % to 2050 with a move from coal and natural gas to low-emission sources such as solar and wind. Dr Berlijn commented that within Europe much work has been carried out towards planning the future electricity grid and engineers have seen this situation coming for many years. As well as plans for new electricity infrastructure, there is a need for more and other types of production, more and larger storage facilities, and a need for more flexibility. She added that it takes time to build all this infrastructure because of the democratic processes involved.

Dr Berlijn said that there are many positive benefits associated with "green" investments; the European Green Deal will avoid the emission of 55 megatons of CO_2 each year. Addressing the identified needs by 2040 would represent 45 billion € of investments, translating directly into jobs and growth. The Green Deal is good for the environment, it will create jobs and it is good for everyone, however there are problems that are limiting progress. The major problem is about keeping the lights on and this is becoming more and more difficult. This is because electricity supply and demand need to be in balance every single moment of every day. Production and the consumption need to be exactly in balance and if this is not the case there will be a change in frequency. If there is surplus production of electricity, the frequency goes up. If there is too much demand, the frequency will go down. There is an additional problem of intermittent sources, for example idle power and wind power. The issue of keeping supply and demand in balance is becoming more difficult as there a lot of things happening with much less time to act. There is inertia in the power system, and this inertia is disappearing; previously it was possible to take up to seven seconds to initiate actions, whereas now there is almost zero time to react. With more people coming onto the network, balancing supply and demand is more and more complex.

There is a challenge for renewables because there is often a big discrepancy between installed capacity and what is actually produced. In the past it was possible to guarantee very stable power production whereas there is long-term volatility with wind and photovoltaic electricity production. Another challenge exists with the installation of solar power with regard to the daily load curve; companies are unwilling to generate solar electricity on a large scale with huge capital investments to produce power for only a few hours a day. To overcome this challenge there must be enough storage capacity to provide flexibility in the hours with an unchanged top load.

[37] https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022

There are indications that improving flexibility and increasing storage capacity will progress faster than expected. This is being driven by the fact that it is cheaper to generate electricity with wind power than it is with coal. Many coal-fired power plants are going bankrupt and large energy companies want to have green electricity initiatives because it is part of their sustainable business model or can be used as marketing. Other major challenges are that the margins in the energy system are shrinking, and there are more unexpected events happening. For example, in the Stockholm region there are 50 power outages a year because of cyber-attacks.

Dr Berlijn posed the question of how to solve the challenges that arise as a consequence of a pace of change that is moving much faster than anticipated. The international metrology community will be able to play a major role in addressing the challenges. One solution is the development of integrated energy systems, which will require measurements to enable both new and existing infrastructure to become fully digital. These integrated energy systems will include many new and emerging power generation technologies and improvements to existing infrastructure, for example climate-friendly airports and environmentally-friendly maritime transport. The solution to the many challenges will require both new and existing infrastructure, and the solutions will need to be fully measurable, controllable and digital. In addition, there is a need for improved communication, better protocols, better market solutions, but most of all there is a need for more measurements.

Dr Berlijn gave the example of the need for improved operational control for energy systems and the associated requirement for input from the metrology community. Operational control for energy systems will need to be able to handle more expected and unexpected events, with less time to react. This would be impossible with control systems based on manual processes, so it will be necessary to fully automate the protection, control and operational processes. There will also be a requirement to automate flexibility in the system. Development of control centres will take advantage of the digital transformation to use novel digital technologies to solve traditional problems. It is essential that new types of innovation and creativity are enabled, rather than simply enhancing and supporting traditional methods. The integrated energy systems will not only require measurements on small scale, accuracy of measurement at a national and continental level will also be required. The European electricity network for example is interconnected, so something that is happening in Spain will affect something that is happening in the north of Norway. The result is that considerable efforts will be required to synchronize all these measurements.

The development of integrated energy systems will also require better control of the associated infrastructure, because it takes time to build new infrastructure. It will be necessary to use the existing infrastructure much better and that will require constant information if unplanned outages are to be expected and if it is possible to use the infrastructure at an optimum; this will require a considerable volume of measurements. For example, there will be a need to control temperature, oil pressure, gas and oil analysis, current, voltage, power, phase shift, etc. These criteria will need to be measured continuously because as well as needing to know what is going on at any particular time, it is also necessary to know the condition of the infrastructure and the action status to be able to make a decision if there is for example an overload. This will require much more AI, data transfer and interaction, as the measurement data streams will become extremely large in terms of both quantity and speed. AI is faster than human calculations, for example in calculating imbalances in the system, AI is at least 50 % faster than humans. Full digitalization and automation increases the quality of supply, however it adds a new risk associated with cybersecurity and digital resilience.

Dr Berlijn said that the challenges are associated with the enormous amount of reliable and accurate measurements that are needed in future sustainable energy networks. She concluded by saying that it is possible to create a sustainable planet. A sustainable, digital, carbon neutral energy system, with the digital electricity grid as a backbone, is one of the enablers. It is feasible to make this transition and not

too expensive. Energy transition is self-reinforcing because of sustainable and economic drivers. Investing in a sustainable, digital energy system will create jobs, reduce generation costs and create a sustainable economy. It is possible to create a sustainable economy, but it cannot be achieved without measurements; it is economically sustainable, technically feasible and measurable.

The President thanked Dr Berlijn and commented that everybody wants to take this path to a carbon neutral world and the presentation explained that the more control you make, the better you can take these paths. However, at the same time, this will need massive deployment of measurement systems and massive energy consumption for the control system itself. He asked how it is possible to evaluate the sustainability budget.

Dr Berlijn replied that from an engineering perspective, it would have been much better if the electricity system had never been deregulated. Although the infrastructure was used in a much more optimal way than before, it was forgotten that demand for electricity is continuously increasing. There followed a period of about 20 years where no new powerlines were built in many countries around the world. The situation is now that there is a need to catch up with building new infrastructure but there has been a loss of competences and companies. As well as the need to build new infrastructure, the current infrastructure needs to be used much better. In order to make the green transition, it will be necessary to use the existing infrastructure in a much better way because it takes a long time to build new facilities. In Norway it takes seven years to build a new powerline, in Sweden it takes 25 years, and in many countries around the world it takes between 7 and 25 years. In order to reach the climate goal in 30 years' time there will be many challenges, including the democratic processes. Everyone wants a green planet but no one wants to have a power line close to their home, and this is one of the challenges. Engineers and scientists need to develop ways to solve these problems. She stressed that the work carried out by the metrology community is extremely important because accurate time measurements are important to the future sustainable energy networks, for example accurate timing to 10^{-18} seconds. Greater accuracy will improve efficiency of the current infrastructure and will reduce electricity bills. Dr Berlijn said that she hoped that this would provide some kind of motivation.

48. Report from the President of the CCEM

Prof. Rietveld, President of the Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM), presented his report on the activities of the CCEM since the 26th meeting of the CGPM (2018).

CCEM Executive summary

The CCEM covers a very broad field of metrology with many derived units, over a large range of values and covering a wide frequency range. Until 2018, a significant amount of work was devoted to Kibble balances, in terms of electrical method to realize the kilogram, in support of the planned revision of the SI. Since the 26th CGPM, work focused on further promoting the revised SI and to assure a correct implementation of the revised SI in the EM community on 20 May 2019. The CCEM was pleased to note that the small step changes in the realization of the volt and the ohm (and related derived quantities) caused by implementation of the revised SI have not led to any problems in industry.

In 2020, the CCEM strategy has been completely revised, setting new priorities for the future. These include addressing future challenges for electrical measurement science originating from the development of emerging technologies for example smart electrical grids incorporating renewable energy production, high-frequency communication, electric vehicles and sensor networks. To enhance the impact on global measurement challenges, workshops have been organized with contributions from

high-level speakers from industry. Capacity building and further interactions with industry were promoted by starting a series of webinars showcasing the relevance of EM metrology to the wider EM stakeholder community.

Steps have been taken to further increase the impact and the efficiency of the CIPM MRA in the EM area, most notably via supporting the BIPM in developing and implementing the KCDB 2.0, via more strategic planning of comparisons, and the full implementation of a more efficient CMC review process. The BIPM has provided continued and important support to the world-wide comparability of EM measurements, amongst others, via its ongoing key comparison programme.

Scope of the CCEM

The CCEM is responsible for advising the International Committee for Weights and Measures (CIPM) on all matters related to measurement standards for electricity and magnetism, including the EM work programme activities of the BIPM Physical Metrology Department.

The application of electricity is ubiquitous in daily life and electrical metrology covers a broad field involving many quantities and requiring many derived standards. Typical examples are voltage, current, resistance, capacitance, inductance, power, transformer ratio, ac-dc transfer, electrical field strength, magnetic field strength, antenna factors and radiofrequency scattering parameters. In many cases, the quantities span both a very wide range of values (for example nanovolts to megavolts) and frequencies (ranging from dc far into the radiofrequency range), with different techniques required for different ranges.

Due to the vastly different technologies required in the low frequency and the radiofrequency ranges, the detailed technical work of the CCEM is undertaken by two CCEM Working Groups: a low-frequency and a radiofrequency working group (WGLF and GT-RF respectively). A third working group (WGRMO) assures an effective and efficient implementation of the CIPM MRA in the EM community, which is a particularly relevant task given the wide range of CMCs in electromagnetic metrology.

Strategy

In 2019–2020, a completely revised CCEM strategy was developed and approved by the CCEM members, setting new priorities for the future. The strategy was based on the outcomes of the 2017 CCEM workshop on “Future Challenges in Electrical Metrology” and subsequent discussions within the CCEM. These include addressing future challenges for electrical measurement science originating from the development of emerging technologies like smart electrical grids incorporating renewable energy production, high-frequency communication, electric vehicles and sensor networks. Fundamental quantum phenomena underpin the extraordinary accuracy that can be achieved with electrical measurements and the CCEM support to development of novel quantum technologies will continue to have a significant impact on electrical metrology. A general challenge for the CCEM community is the ubiquitous application of electricity and electrical measurements that leads to a large number of electrical quantities, having wide ranges of values and frequencies ranging from dc far into the GHz-range.

The CCEM aims to provide leadership and vision to NMIs and DIs to inform their decisions on measurement science and research activities. To this end, it organizes information exchange through scientific presentations and workshops on emerging technologies with high-level speakers from industry. To further enhance capacity building and interactions with industry, a series of webinars started that showcase the relevance of EM metrology to the wider EM stakeholder community.

The CCEM supports the global comparability of measurements by implementing the CIPM MRA through the organization of key comparisons and coordination of RMO key and supplementary comparisons. It maintains an extensive list of service categories for which CMCs can be submitted.

The CCEM seeks actively for ways to further improve the efficiency of comparison organization and CMC review.

An important part of the CCEM's work is to oversee the work programme of the BIPM electricity laboratories. The BIPM comparison services form an integral part of the CCEM comparisons and allow NMIs to uniquely demonstrate their measurement capabilities at the best uncertainty levels. BIPM calibration services provide traceability to a significant number of NMIs without their own primary realizations.

Activities and achievements since the last meeting of the CGPM

Main activities and achievements

Following the major scientific efforts in the years preceding the introduction of the revised SI on progressing electrical methods to realize the kilogram (Kibble balances), the focus of this research has now shifted to supporting the CCM community in advancing implementation of Kibble balances for realizing the kilogram and in extending the use of (simplified) Kibble balances over a wider range of mass. The CCEM was pleased to note that the introduction of the revised SI, and the small step change this introduced in voltage and resistance measurement and derived quantities, has not led to any significant problems in the industrial and wider electrical stakeholder community. Following this success, the two working groups related to this work, the WGSI and WGKG, were closed with particular gratitude to excellent work performed by the chairs of these groups, Dr Ian Robinson, Dr Barry Wood and the late Dr Brian Kibble.

The CCEM also started supporting the CCRI with its expertise of small current measurements with the aim "to guide the introduction of new technologies for the measurement of low electrical current for ionization chambers used in the measurement of radionuclide standards." A joint CCEM-CCRI task group of 18 experts is preparing a 'best practice guide', that will improve traceability in radionuclide metrology and possibly allow for reducing the number of sealed radioactive cells required to check the linearity over a certain range.

A fully-revised CCEM strategy was developed by a task group consisting of the CCEM President, Executive Secretary and WG chairs based on the results of a highly-successful workshop on "Future challenges in electrical metrology" in 2017 and subsequent discussions in the CCEM. This strategy, setting the direction and priorities of the CCEM for the coming decade, was discussed and adopted by the CCEM members at the 32nd meeting of the CCEM in April 2021.

One of the main aims of the CCEM is to provide leadership and vision to NMIs and DIs to inform their decisions on measurement science and research activities. Scientific presentations providing insight in the state of the art in certain EM areas therefore form an important part of the CCEM meeting agendas. In addition, stimulated by the success of the first strategy-related workshop in 2017, a scientific workshop on "Metrology for radiofrequencies and microwaves (RF&MW)" was held in conjunction with the 31st meeting of the CCEM in March 2019. At this workshop, speakers from industry, universities and NMIs provided overviews of recent challenges in RF&MW metrology related to among others mm-wave wireless communications, implementation of 5G networks, and on-wafer RF characterization of devices for the mobile industry.

To further enhance capacity building and interactions with industry, a series of webinars were started in 2022 that showcase the relevance of EM metrology to the wider EM stakeholder community. These CCEM webinars aim to promote the sharing of knowledge within the wider CCEM community, not only at the high end, but also more basic topics. Compared to presentations at scientific presentations, webinars aim to be more pedagogical and include an introduction to the topic. The first webinar

summarized the CCEM strategy and the BIPM work programme and was attended by more than 100 participants from all regions world-wide. The webinars are available on the BIPM YouTube pages.

The effective and efficient implementation of the CIPM MRA is a recurring item on the agenda of the CCEM and its working groups, and in particular of the CCEM WGRMO. Major support has been given to the BIPM in setting up and implementing the KCDB 2.0. The launch of the web-based user platform of the KCDB 2.0 in October 2019 marked a major improvement in the CMC submission and review process, which is particularly relevant for the CCEM community with its more than 4 000 entries (including complex matrices) over 190 services categories.

Key comparison results are the technical basis of many CMC submissions. After a first series of comparisons following the start of the CIPM MRA, a second round of key comparisons (KCs) is being strategically planned and performed. The KC planning aims to optimize the workload and confidence in international traceability of electro-magnetic quantities world-wide. In several KCs, the workload of coordinating the comparison is shared among several NMIs. The BIPM has performed a first CCEM comparison using a star scheme, where all participating NMIs sent their travelling standard to the BIPM at the same time. This approach required a significant effort by the BIPM as the central laboratory in the star scheme, but at the same time allowed completion of the comparison in 20 months. Because of this major advantage, where possible, this star-scheme approach will be adopted in future CCEM comparisons.

Challenges and difficulties

The Covid-19 pandemic was a major challenge for the CCEM community. It has limited the opportunity for exchange of information and for in-depth discussions during in-person CCEM meetings and the related (highly-appreciated) scientific workshops. At the same time, the increased use of web-based meeting facilities has increased interactions within the CCEM working groups and task groups. It also allowed the launch of the CCEM webinars that facilitated increased outreach to the wider EM stakeholder community, including standardization and industry.

A second challenge is to ensure sufficient progress in the key comparisons. Whilst this has already been an attention point in the past due to customs issues or technical problems with the travelling standards for example, the pandemic has further impacted the progress of several CCEM key comparisons, causing delays of up to more than one year. It is expected that the increased use of the star scheme will increase the efficiency of future comparisons and reduce the total lead time.

Outlook in the short and long term

In the coming years, CCEM activities will focus on implementing the renewed CCEM strategy, on promoting electrical measurement science and global comparability, and on improving stakeholder involvement. The latter will include further organization of workshops, expanding the webinar programme, and strengthening links with other international organizations and the wider EM industry, for example in developing foresight exercises.

Continuous attention will be paid to efficient implementation of the CIPM MRA, with particular emphasis on improving the total lead time of key comparisons. The BIPM programme will play an important role in supporting the CCEM community. New BIPM services to the CCEM community are expected to become available in the coming years, covering for example traceability of AC signals exploiting AC quantum voltage standards, and improved traceability in impedance via the calculable capacitor and the (AC) quantum hall effect based on graphene.

On the longer term, the CCEM is expected to increase its contributions to major scientific and technological metrology challenges related to global themes like the energy transition, to extended

implementation of quantum standards in industry and to the wider ubiquitous application of electricity and electrical measurements in our societies.

CCEM Data

CCEM set up in 1927 (as the CCE)

President:	G. Rietveld
Executive Secretary:	M. Stock
Membership:	26 members and two observers
List of CCEM members and observers:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccem/members
Meetings since the 26th CGPM meeting:	28-29 March 2019, 14-15 April 2021
Full reports of the CCEM meetings:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccem/publications
Three Working Groups:	https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccem

- RMO Coordination (WGRMO)
- Low-Frequency Quantities (WGLF)
- Radiofrequency Quantities (GT-RF)

CCEM Comparison activity	Completed	In progress	Planned
CCEM key comparisons (and supplementary comparisons)	50	7	7
BIPM comparisons	1	9 (ongoing)	9 (ongoing)
CCEM pilot studies	0	1	2
CMCs	4642 CMCs in 194 service categories registered in the KCDB		

The President thanked Prof. Rietveld and invited questions.

Dr Laiz (Argentina) commented that in the invited talk about sustainable energy networks, it was noted that new energy networks need fast, widely deployed measurements and synchronized measurements. The CGPM will be passing a resolution to have only one timescale and to avoid different timescales with time differences. He asked Prof. Rietveld to comment on the importance of this issue for the electricity networks.

Prof. Rietveld replied that it is indeed absolutely crucial. He recalled that as mentioned by Dr Berlijn, one of the key aspects of the grid is to remain stable. A key measurement to retain stability in the grid is to measure two locations in the grid, and these measurements need to be synchronized. If one of these measurements is not implementing the leap second correctly it could lead to a blackout. The implementation of the digital instrumentation needs to be carried out correctly otherwise once the use of the instrumentation starts, there could be problems in the grid, and that has a major social impact. A huge blackout almost two decades ago in North America and Canada was analysed and the cause was traced to lack of measurements in the control room. Synchronization is a key component. The timing required is at the microsecond level, which may appear to be easy for the time and frequency community, however getting it right throughout the grid, and in a synchronized way, is a challenge. This will require cooperation between the electrical measurements community and the time and frequency community, and the timing is absolutely critical. For this reason it is crucial to get rid of the leap second.

49. Introduction to Draft Resolution V "On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027"

Dr Louw, President of the CIPM, said that he would not present the full text of Draft Resolution V because there had been many discussions on the dotation over the previous months and during the course of the meeting. He recalled that the CIPM has reported on the outputs from the BIPM Director and staff and the Consultative Committees. Representatives of Member States have expressed their support for the proposed dotation, and they have given input on how to further improve the BIPM's systems. This input is appreciated and he guaranteed that the new CIPM that will be elected will build on this further. The CIPM has reported that the governance structures were further strengthened and modernized since 2018 and this will be enhanced within the Organization, with the development of the By-Laws, to be adopted by the CGPM at its next meeting. He thanked Member State representatives and the *ad hoc* working group for their input on these issues. Dr Louw said that he assumed all questions have been answered on the BIPM work programme for 2024-2027 and handed back to the Chair to ask if there were any further statements or if any additional clarification was required. There were none.

50. Voting on Draft Resolution V "On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027"

Dr Usuda, CIPM Secretary, reminded delegates that a Special Procedure regulating the conduct of the meeting had been adopted earlier in the meeting. He presented the relevant points of the procedure relating to the adoption of resolutions and decisions (points 10 to 13), which are given in the document "CGPM Working Document, October 2022". He said that for the voting on Draft Resolutions A to F, each delegation will be asked, either in person or on-line, to indicate whether they are for, against or abstain. Dr Usuda added that he will support the President of the CGPM during voting, particularly by checking the on-line participants so that no replies are missed. Voting on Draft Resolution V will be via a roll call due to its particular importance.

In addition, he presented the procedure for election of the CIPM and Committee for the Election of the CIPM (CEC) and referred to point 17 in the document "CGPM Working Document, October 2022". He stressed that only delegates present in person will be able to cast a vote for these elections. Separate voting papers for CIPM and CEC members would be provided to the delegates and the results of each election would be scrutinized by an independent third-party voting service.

The President thanked Dr Usuda and the voting on Draft Resolution V by roll call commenced.

Draft Resolution V was adopted as Resolution 7 "*On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027*". A total of 40 of the 64 Member States voted positively for Draft Resolution V. There were eleven abstentions: Austria, Belarus, Canada, Costa Rica, Egypt, Mexico, Montenegro, Morocco, Russian Federation, Tunisia and USA. Fourteen Member States were absent from the voting: Bulgaria, Chile, Colombia, Denmark, Ecuador, Greece, Hungary, Iran (Islamic Republic of), Ireland, Israel, Pakistan, Serbia, Ukraine and Uruguay. There were no votes against.

Ms Macdonald (Canada) commented that the Canadian delegation was concerned that the on-line voting was not visible or audible to all participants in the meeting room although it had been possible to see some of the on-line comments. The Director of the BIPM said that a record of the "chat" function from the on-line system could be made available for reference if requested.

51. Opening of voting on election of the CIPM and CEC (explanation and method)

Mr Gunn, Chair of the Committee for CIPM Election (CEC), recalled that the current procedure for electing the CIPM was established at the 25th meeting of the CGPM (2014). He said that delegates present have heard that the new CIPM will develop By-Laws for the Organization. He indicated that he hoped that the procedures for electing the CIPM members would be incorporated into the By-Laws document and presented for approval at the next meeting of the CGPM.

He reported that a total of 27 nominations for election to the CIPM had been received in response to the call to Member States. In two cases there was insufficient supporting information to consider the candidates, leaving 25 qualified candidates. According to the procedure, the CIPM considered these candidates and passed a summary of their views to the CEC. The CEC considered the candidates against the criteria set down in its procedure during a series of on-line meetings.

On this basis, the CEC highlighted the names of those candidates it thought would provide a well-balanced and representative CIPM for the next four years. In order to obtain a consensus for the present election, and given the current geopolitical situation, this year the CEC has submitted to the Member States a slate with 19 recommended candidates for CIPM membership along with a list of all other candidates assessed as qualified.

Mr Gunn added that there had been a late development. On 17 November the CEC had been informed, through an official letter from the Embassy of Ukraine, that the candidate from Ukraine does not have the support of their government for election to the CIPM. Whilst such support is not a requirement of the Metre Convention, as the CIPM members are not elected as State representatives, it was a criteria mentioned in the document "Criteria and Process for Election of CIPM Members" approved by the CIPM. Therefore, this information is brought to the attention of Member States so that it may be duly taken into consideration when casting votes.

Mr Gunn explained that the CIPM election will proceed as a secret ballot. The ballot papers contain the names of 25 candidates and each Member State can vote for up to 18 candidates from the names listed. It is not necessary to use all 18 votes, but if more than 18 are marked on the ballot papers, it will be invalid.

Mr Gunn indicated that in addition to the CIPM election, there will be an election for the CEC. This election requires delegates to vote for nine candidates from eleven nominations. There are no recommendations for this election.

Independent scrutineers had been contracted to count the completed ballot papers for both elections.

It was agreed that following the receipt of the late information regarding the candidate from Ukraine, Member States' delegates would be given extra time to complete their ballots for both elections and that the completed ballots should be put into the ballot boxes within a given time, which was overseen by the independent scrutineers.

52. Voting on Draft Resolutions A, B and C

Draft Resolution A

Dr Louw, the President of the CIPM, recalled that Draft Resolution A "*On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology""* is a first step towards developing a CIPM strategy 2030+. He noted that the text had been available since early 2022.

He asked if any further clarification on the Draft Resolution was needed; there were no further comments.

The President of the CGPM asked for a show of hands, both within the meeting room and on-line, in favour of adopting Draft Resolution A. It was adopted unanimously as CGPM Resolution 1 (2022) "*On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology"*". There were no abstentions.

Draft Resolution B

Dr Louw presented some of the highlights of Draft Resolution B "*On the global digital transformation and the International System of Units*".

The President of the CGPM asked for a show of hands, both within the meeting room and on-line, in favour of adopting Draft Resolution B. It was adopted unanimously as CGPM Resolution 2 (2022) "*On the global digital transformation and the International System of Units*". There were no abstentions.

Draft Resolution C

Dr Louw presented the text of Draft Resolution C "*On the extension of the range of SI prefixes*". There were no questions or comments.

The President of the CGPM called for a show of hands, both within the meeting room and on-line, in favour of adopting Draft Resolution C. It was adopted unanimously as CGPM Resolution 3 (2022) "*On the extension of the range of SI prefixes*". There were no abstentions.

The Director commented that an updated version of the 9th edition of the SI Brochure, Version 2.01, will be published in December 2022. This new version will include the newly agreed SI prefixes as well as some minor typographic improvements.

Seventh session – 18 November 2022 (afternoon)

The President of the CGPM welcomed the delegates to the seventh session.

53. Voting on Draft Resolutions D, E and F

Draft Resolution D

Dr Louw, the President of the CIPM, recalled that Draft Resolution D "*On the use and future development of UTC*" had been the subject of the presentation by Dr Dimarcq, President of the CCTF, in §40. Dr Louw presented the main points of the Draft Resolution.

The President of the CGPM called for a show of hands, both within the meeting room and on-line, in favour of adopting Draft Resolution D. It was adopted as CGPM Resolution 4 (2022) "*On the use and future development of UTC*". Belarus abstained from the vote and the Russian Federation voted against Draft Resolution D.

The President of the CGPM said that based on the results of the vote, it is clear that there is a large majority in favour of adopting this Resolution. He added that the substance of the resolution is not in question, it is more a question about the timing of the adoption of actions in this resolution. The Director said that it is for the CIPM to take forward and the CIPM will reflect on the vote, as it does on all of the votes, and go forward as it decides, to the next conference. The President of the CIPM reiterated that Draft Resolution D has been adopted, and the CIPM will consider any practical issues raised.

Draft Resolution E

Dr Louw said that Draft Resolution E "*On the future redefinition of the second*" had been presented and discussed in §40. He read through the main points of the Draft Resolution.

The President of the CGPM called for a show of hands, both within the meeting room and on-line, in favour of adopting Draft Resolution E. It was adopted unanimously as CGPM Resolution 5 (2022) "*On the future redefinition of the second*".

Draft Resolution F

Dr Louw presented the text of Draft Resolution F "*On universal adherence to the Metre Convention*", which was displayed. The President of the CGPM called for a show of hands, both within the meeting room and on-line, in favour of adopting Draft Resolution F, which was adopted unanimously as CGPM Resolution 6 (2022) "*On universal adherence to the Metre Convention*".

54. Announcement of the results of the election of the CIPM and the CEC

The President of the CGPM called on the independent scrutineer, Ms Villatte, to announce the results of the election of the CIPM. The results were as follows:

Candidate	**Nationality**	**Votes**
Richard, P.	Swiss	41
Usuda, T.	Japanese	41
Laiz, H.	Argentinian	40
Louw, W.	South African	40
Rastello, M.L.	Italian	40
del Campo Maldonado, D.	Spanish	39
Dimarcq, N.	French	39
Olthoff, J.	American	39
Coleman, V.	Australian	39
Ullrich, J.	German	39
Park, S.-R.	South Korean	38
Macdonald, G.	Canadian	36
Rietveld, G.	Dutch	36
Duan, Y.	Chinese	35
Janssen, J.-T.	British	35
Achanta, V.G.	Indian	34
Ripper Palmeira, G.	Brazilian	32
Neyezhmakov, P.	Ukrainian	21

Mr Gunn, Chair of the CEC, asked for the CGPM to take a short break so that he could meet with the members of the CEC to consider the result of the CIPM election.

His Excellency Mr Cozendey (Brazil) asked for clarification since he understood that the vote had been carried out. He asked if the voting for the CIPM had been concluded and whether the CEC meeting has any implications for the vote.

A discussion followed among the delegates and the Director suggested that the session should progress to receive the results of the CEC election and come back to the Brazilian question.

The President called on the independent scrutineer, Ms Villatte, to announce the results of the election of the CEC. The results were as follows:

Candidate	**Affiliation**	**Votes**
Kobata, T.	NMIJ/AIST (Japan)	44
Chambon, M.	LNE (France)	42
Gunn, R.	NPL (UK)	42
Saundry, C.	NIST (USA)	42
Höll, A.	BMWK (Germany)	41
Kang, C.-S.	KRISS (Republic of Korea)	40

Candidate	**Affiliation**	**Votes**
Melanson, J.	NRC (Canada)	39
Xie, J.	AQSIC (China)	37
Alfaleh, I.	SASO-NMCC (Saudi Arabia)	23
Mikiel, M	GUM (Poland)	23

The Director said that because there had been a tie for the ninth position on the CEC, it would be necessary to hold a second round of voting, with two names on the ballot paper (Marcin Mikiel and Ismael Alfaleh). The ballot papers would be distributed and the voting would take place, overseen by the scrutineers, during a 20-minute break.

The meeting resumed after a 20-minute break and Dr Louw, President of the CIPM, asked if all the votes had been cast for the second round of voting for the CEC. It was confirmed that all votes had been cast and the scrutineers were authorized to start the counting. Following the count, the scrutineer announced that Ismael Alfaleh, SASO-NMCC (Saudia Arabia) was elected to the CEC.

The discussion returned to the issue of the CIPM election. Mr Gunn, Chair of the CEC, said that the CEC had held a discussion and had reviewed the letter received from the Ukrainian embassy during the break.

A discussion followed between the CEC Chair and delegates concerning the results of the election of the CIPM that was announced previously, which focused on whether the candidate from Ukraine had support from the government of Ukraine.

The CEC Chair made a proposal to hold a new election. Delegates from several Member States spoke against the proposal; the majority considering that the election of eighteen CIPM members represented the shared intention of the States parties to the Metre Convention that had voted, and therefore the results should stand.

The President summarized by saying that there is a clear procedure for the CIPM election. There was a list of candidates, delegates were provided with all the necessary information about the candidates before the vote took place, an election was held, and the result of the election is to be considered valid.

There is an outstanding issue on what a candidate should do if they do not have the support of their government. At present, there is nothing remaining to vote for or to decide. The election result stands and the only possible change in the composition of the CIPM would be if a member may resign in the future.

55. Plans for the 150th anniversary of the Metre Convention on 20 May 2025

Dr Louw gave a presentation on the plans to celebrate the 150th anniversary of the signing of the Metre Convention on 20 May 2025. He recalled that the Metre Convention was signed in Paris, by 17 nations, on the 20 May 1875, to ensure the international unification and perfection of the metric system. The aim of these events will be to celebrate the achievements of 150 years of metrology by the BIPM; to present a new vision and strategy for the BIPM for 2030 and beyond; and to promote metrology to the widest possible global audience. Possible venues are being considered, including the UNESCO headquarters and the Palais des Congrès, Versailles.

The Resolutions adopted by the 27th meeting of the CGPM, particularly Resolutions 1, 2 and 6 give the CIPM a mandate to develop a strategy for 2030+ and to propose a new vision and mission for the BIPM. It also allows the CIPM to propose a new model for participation in the organization and to take actions

to further modernize the governance. The timeline calls for the development and consultation on proposals for a new vision and strategy and the model for broader participation during 2023 and 2024. The CIPM will present this new mission, vision, and model for broader participation in May 2025.

For the remainder of 2025, the CIPM will respond to comments on proposals for new funding models and will bring the resolutions to the meeting of the CGPM for final approval in 2026. If the CGPM adopts the new vision and mission, and the participation and funding models, they will be fully implemented by 2030.

The CIPM has two projects that will be launched in June 2023, ahead of the 150th anniversary. The CIPM Strategy for 2030+ involves development and consultation on a new vision and strategy for the BIPM and world metrology. The work will consider options for enlarging participation in the BIPM. The CIPM will launch a consultation amongst young metrologists on their global vision for metrology 2050+. This is a global project that will trigger and facilitate discussions among groups of young metrologists, proposed by all RMOs to consider their future vision for metrology.

56. Other business

Ms Macdonald (Canada) thanked the BIPM for organizing the meeting. She noted that it takes a lot of effort by the members of the BIPM staff who do all the background work over a number of years before the meeting. This year has been particularly complicated and challenging with the on-line and hybrid model.

The BIPM Director added his thanks to all the BIPM staff and secondees who had been involved in the meeting.

57. Closure of the meeting

The President made some closing remarks, observing that he was personally very happy to attend the meeting as it was an opportunity for him to enter a new world, to discover the metrology community that deals with science in a different way. The meeting was for him very instructive and very interesting.

Dr Louw, on behalf of the CIPM, thanked Professor Flandrin for chairing the Conference with great efficiency.

The President of the CGPM closed the 27th meeting of the CGPM.

Resolutions adopted by the General Conference on Weights and Measures at its 27th meeting (2022)

Resolution 1	On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the “Evolving Needs in Metrology”	**394**
Resolution 2	On the global digital transformation and the International System of Units	**395**
Resolution 3	On the extension of the range of SI prefixes	**397**
Resolution 4	On the use and future development of UTC	**398**
Resolution 5	On the future redefinition of the second	**400**
Resolution 6	On universal adherence to the Metre Convention	**401**
Resolution 7	On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027	**403**

Resolution 1

On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology"

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 27th meeting,

recalling

- Resolution 2 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007) that invited the International Committee for Weights and Measures (CIPM) to report to subsequent General Conferences on the evolving needs in metrology and to prepare proposals for initiatives to be taken by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) at the international level,
- Resolution 1 adopted by the CGPM at its 26th meeting (2018) on the revision of the International System of Units (SI) that defined the seven base units in terms of fixed numerical values of the defining constants that introduced new opportunities for the realization of the units,
- Resolution 3 adopted by the CGPM at its 26th meeting (2018) that welcomed the development of a long-term strategic view which, together with a consolidated planning process, underpins the development of the BIPM work programme in consultation with Member States,

noting

- the essential role of the International System of Units (SI) in providing confidence in the accuracy and global comparability of measurements needed for international trade, manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and scientific research,
- the critical role of metrology in addressing global challenges, including climate change and environment, health and life sciences, food safety, energy, advanced manufacturing, digital transformation and countering global pandemics,
- the increasingly multidisciplinary nature of measurement in new or disruptive technologies, and the new requirements for metrology in digital technologies, sensor networks, and big data,

welcoming the report of the CIPM on the "Evolving needs in metrology",

encourages the CIPM

- to develop a long-term vision for an international measurement system that will remain relevant and adequately address new metrological challenges,
- to establish inter-disciplinary ("horizontal") groups that will address these new challenges and will be complementary to the existing quantity-based ("vertical") structure of its Consultative Committees,
- to mark the 150th anniversary (on 20 May 2025) of the signing of the Metre Convention by outlining a new vision for the BIPM that builds on the CIPM report on the "Evolving Needs in Metrology" and is based on a review of the achievements of the BIPM and the future requirements for its work,
- to consult widely on its proposal for a new vision for the BIPM to be presented at the 28th meeting of the CGPM (2026),

and invites Member States and National Metrology Institutes to contribute to the work of the CIPM in addressing the evolving needs for metrology and in developing a new vision for the BIPM.

Resolution 2

On the global digital transformation and the International System of Units

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 27th meeting,

considering

- that governments, industry, academia, and civil society have been working toward a comprehensive digital transformation for many years, and, in so doing, are:
  - establishing systems to collect, aggregate, analyse and interpret digital data,
  - introducing networked sensor systems for diverse scientific and industrial applications,
  - sharing data at local, national, regional and international levels,
- the essential role of the International System of Units (SI) in providing confidence in the accuracy and global comparability of measurements needed for international trade, manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and scientific research,

anticipating that

- maintaining and building confidence in the accuracy and global comparability of measurements will require the creation of a full digital representation of the SI, including robust, unambiguous, and machine-actionable representations of measurement units, values and uncertainties,
- successfully effecting such a comprehensive digital transformation will require engagement with a wide range of stakeholders including, but not limited to, the International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), International Organization of Legal Metrology (OIML), International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), Committee on Data for Science and Technology (CODATA) of the International Science Council, and other scientific, regulatory, and quality infrastructure communities,

welcomes

- the recent efforts to articulate guiding principles for a digital transformation in metrology,
- the establishment of a flexible and inclusive governance structure supporting the development and implementation of that transformation,

encourages

- the CIPM to continue its outreach and engagement initiatives to ensure that the Metre Convention naturally extends its role as the globally accepted anchor of trust for metrology into the digital era,
- the CIPM to undertake the development and promotion of an SI Digital Framework, that will include the following features:
  - a globally accepted digital representation of the SI, compatible with, and useable within, digital data exchange standards and protocols, whilst maintaining compatibility with existing non-digital solutions,
  - facilitating use of digital certificates in the existing robust infrastructure for the world-wide recognition and acceptance of calibration and measurement capabilities,
  - the adoption of the FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) for digital metrological data and metadata, ensuring that other communities recognize the critical importance of metrological traceability for measurement data, the latter being an established requisite for building trust,

invites

- National Metrology Institutes, Regional Metrology Organizations and other stakeholders to maintain and, where possible, increase their existing level of commitment and collaboration with the CIPM to continue the development, promotion and implementation of the SI Digital Framework,
- all organizations with an interest in, or activities related to, the quality infrastructure – that relies on metrology, standardization, accreditation, conformity assessment, and market surveillance – to consider joining the collaborative venture of the digital transformation to ensure that the SI Digital Framework meets the needs of all stakeholders.

Resolution 3

On the extension of the range of SI prefixes

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 27th meeting,

recalling that decisions were made at previous meetings when it was considered timely to extend the range of SI prefixes including Resolution 12 (paragraph 3) adopted by the CGPM at its 11th meeting (1960), Resolution 8 adopted by the CGPM at its 12th meeting (1964), Resolution 10 adopted by the CGPM at its 15th meeting (1975), and Resolution 4 adopted by the CGPM at its 19th meeting (1991),

considering

- the essential role of the International System of Units (SI) in providing confidence in the accuracy and global comparability of measurements needed for international trade, manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and scientific research,
- the benefits of encouraging the use of SI units by providing new SI prefixes for scientific communities that depend on measurements that are not covered by the current range,
- the needs of data science in the near future to express quantities of digital information using orders of magnitude in excess of 10^{24},
- the importance of timely action to prevent unofficial prefix names being *de facto* adopted in other communities,

decides to add to the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of units the following prefixes:

Multiplying factor	Name	Symbol
10^{27}	ronna	R
10^{-27}	ronto	r
10^{30}	quetta	Q
10^{-30}	quecto	q

Resolution 4

On the use and future development of UTC

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 27th meeting,

recalling that

- Coordinated Universal Time (UTC) is a time scale produced by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) with the same rate as International Atomic Time (TAI), but differing from TAI only by an integral number of seconds,
- the offset by an integral number of seconds is due to the agreement maintained between UTC and the time scale describing the angular rotation of the Earth (UT1),
- when the difference (UT1-UTC), as observed by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), is predicted to approach 0.9 seconds, a leap second is applied according to the procedure described in Recommendation ITU-R TF.460-6 of the International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R),

further recalling that the CGPM at its 26th meeting (2018)

- stated that UTC is the only recommended time scale for international reference and the basis of civil time in most countries,
- recommended all relevant unions and organizations to work together to develop a common understanding on the realization and dissemination of reference time scales with a view to considering the present limitation on the maximum magnitude of UT1 – UTC to meet the needs of the current and future user communities,

welcoming the signature of a Memorandum of Understanding between the BIPM and the International Telecommunication Union (ITU), which ensures that they continue their joint work to improve global access to UTC,

noting that

- the accepted maximum value of the difference (UT1-UTC) has been under discussion for many years because the consequent introduction of leap seconds creates discontinuities that risk causing serious malfunctions in critical digital infrastructure including the Global Navigation Satellite Systems (GNSSs), telecommunications, and energy transmission systems,
- operators of digital networks and GNSSs have developed and applied different methods to introduce the leap second, which do not follow any agreed standards,
- the implementation of these different uncoordinated methods threatens the resilience of the synchronization capabilities that underpin critical national infrastructures,
- the use of these different methods leads to confusion that puts at risk the recognition of UTC as the unique reference time scale and also the role of National Metrology Institutes (and Designated Institutes) as sources of traceability to national and international metrological standards,
- recent observations on the rotation rate of the Earth indicate the possible need for the first negative leap second whose insertion has never been foreseen or tested,
- the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) has conducted an extensive survey amongst metrological, scientific and technology institutions, and other stakeholders, and the feedback has confirmed the understanding that actions should be taken to address the discontinuities in UTC,

recognizing that the use of UTC as the unique reference time scale for all applications, including advanced digital networks and satellite systems, calls for its clear and unambiguous specification as a continuous time scale, with a well-understood traceability chain,

decides that the maximum value for the difference (UT1-UTC) will be increased in, or before, 2035,

requests that the CIPM consult with the ITU, and other organizations that may be impacted by this decision in order to

- propose a new maximum value for the difference (UT1-UTC) that will ensure the continuity of UTC for at least a century,
- prepare a plan to implement by, or before, 2035 the proposed new maximum value for the difference (UT1-UTC),
- propose a time period for the review by the CGPM of the new maximum value following its implementation, so that it can maintain control on the applicability and acceptability of the value implemented,
- draft a resolution including these proposals for agreement at the 28th meeting of the CGPM (2026),

encourages the BIPM to work with relevant organizations to identify the need for updates in the different services that disseminate the value of the difference (UT1-UTC) and to ensure the correct understanding and use of the new maximum value.

Resolution 5

On the future redefinition of the second

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 27th meeting,

recalling that

- the CGPM at its 13th meeting (1967) defined the second as "the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom",
- the CGPM at its 26th meeting (2018) revised the definitions of the base units of the SI including the second, which it defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, which is the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1},

noting that

- optical frequency standards based on different species and transitions in many National Metrology Institutes (NMIs) have surpassed the accuracy achievable by the realization of the current definition by a factor of up to 100,
- the reliability and uncertainty of the related time and frequency transfers are improving significantly,
- some institutes have demonstrated that time scales based on one or more optical frequency standards have the potential to be more accurate than the time scale based on the current definition of the second,
- these advances will allow further improvements in the realization and dissemination of time scales, particularly Coordinated Universal Time (UTC),

further noting that the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) in its work to serve current and future needs in time metrology

- has carried out an extensive survey amongst metrological, scientific and technology institutions, and other stakeholders, which has confirmed world-wide interest in more accurate time and frequency services enabled by a new definition of the second,
- is working to identify the best candidate species or ensemble of species that could serve as the basis for a new definition,
- has prepared a roadmap of the actions and timings needed to decide on a new definition of the second and has established criteria and appropriate indicators to monitor progress towards such a new definition,

encourages the International Committee for Weights and Measures (CIPM)

- to promote the importance of achieving the objectives in the roadmap for the redefinition of the second,
- to bring proposals to the 28th meeting of the CGPM (2026) for the choice of the preferred species, or ensemble of species for a new definition of the second, and for the further steps that must be taken for a new definition to be adopted at the 29th meeting of the CGPM (2030),

and **invites** Member States to support research activities, and the development of national and international infrastructures, to allow progress towards the adoption of a new definition of the second.

Resolution 6

On universal adherence to the Metre Convention

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 27th meeting,

recalling

- that in 1875 the High Contracting Parties desiring to ensure the international unification and the perfection of the Metric System, resolved to conclude a convention to this effect (commonly known as the Metre Convention), and as such embraced the ambition of universal participation from the outset,
- that in 1921, such ambition was embodied in the Convention under Article III that provides for any State to accede to the Convention "[…] by notifying its accession to the French Government […]",
- the relevance and importance placed in promoting and facilitating wider participation as expressed in particular by the CGPM in:
  - Resolution 14 adopted by the CGPM at its 11th meeting (1960),
  - Resolution 2 and Resolution 3 adopted by the CGPM at its 21st meeting (1999),
  - Resolution 3 and Resolution 4 adopted by the CGPM at its 22nd meeting (2003),
  - Resolution 5, Resolution 6 and Resolution 7 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007),
  - Resolution 4 and Resolution 5 adopted by the CGPM at its 24th meeting (2011), and
  - Resolution 3 adopted by the CGPM at its 26th meeting (2018),

noting that

- as a result of the Resolutions recalled above, a number of actions have been initiated by the International Committee for Weights and Measures (CIPM) to facilitate wider participation,
- there has been considerable success, particularly over the last two decades since the launch of the CIPM MRA, in expanding participation, with the number of States that have acceded to the Metre Convention increasing from 48 in 1999 to 64,
- the establishment of the status of Associate of the CGPM, which enables participation by States that are not yet ready to become Member States or by Economies, has been an effective mechanism for increasing national involvement in the international metrology community and constitutes a step towards accession to the Metre Convention,
- the need for access to an effective quality infrastructure in every State will facilitate the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) adopted by the United Nations as part of its 2030 Agenda for Sustainable Development,

committed

- to further strengthening the role of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) and to facilitate wider participation in its activities, thus achieving lasting and universal adherence to the Metre Convention,

welcoming

- the continuous efforts by the staff of the BIPM to strengthen its effectiveness and efficiency as well as the efforts made by the CIPM, Member States, Regional Metrology Organizations and individual National Metrology Institutes to encourage and facilitate wider participation,

– the support given to developing countries by other international organizations for the establishment of the metrology and wider quality infrastructure,

– the joint BIPM and International Organization of Legal Metrology (OIML) annual initiative celebrating World Metrology Day that has played an important role in raising awareness of the benefits of participation in the two intergovernmental organizations and in the Regional Metrology Organizations,

recognizing that

– a significant number of States still do not participate in the activities of the BIPM,
– changes to the structure of contributions and subscriptions and the accorded participation rights may help facilitate universal participation,
– such changes must be equitable to existing Member States and provide a sustainable basis for the intergovernmental organization,

invites the CIPM

– to review the membership practices of other international organizations,
– to examine the current application of Article III of the Metre Convention and report to the CGPM at its 28th meeting on how this Article might be applied in order to facilitate lasting and universal adherence to the Convention,
– to consider the implications of wider participation in the work programme and services of the BIPM,
– to propose appropriate actions for consideration by the CGPM at its 28th meeting.

Resolution 7

On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures for the years 2024 to 2027

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 27th meeting,

considering

- the increased importance of the work of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) to international trade, to industrial innovation, to monitor the global environment, to human health and medicine, to food and forensic science in all Member States,
- the recognition of the BIPM as the scientifically expert intergovernmental organization in metrology and the added value and cost efficiency it provides to all Member States in technical and economic terms,
- the manner in which the BIPM continues to adopt best management practice and to improve the efficiency of its operation,
- Resolution 7 adopted by the CGPM at its 16th meeting (1979) establishing a principle for the determination of the base dotation,

noting

- the current world financial situation and the financial constraints that Member States continue to experience,
- the requirements for the BIPM to develop expertise in the digital transformation of metrology both to transform its own services and to support the work of the CIPM,

welcomes

- the support of all kinds provided to the BIPM by National Metrology Institutes, in particular by way of secondment of staff to the BIPM, and support for the BIPM Capacity Building and Knowledge Transfer programme,

decides that

- the annual dotation of the BIPM, as defined in Article 6 (1921) of the Regulations annexed to the Metre Convention, will be set in such a way that, for those States that are Parties to the Metre Convention at the time of the 27th meeting of the CGPM, it shall be[1]:

13 161 218 euros in 2024
13 358 636 euros in 2025
13 559 016 euros in 2026
13 762 401 euros in 2027

encourages

- Member States, as well as international organizations, private organizations and foundations to maintain the provision of additional voluntary support of all kinds to support specific BIPM mission-related activities, particularly those that facilitate participation in the activities of the BIPM by those countries without well-developed metrology infrastructure.

[1] Costa Rica is not included in the total dotation because its accession was notified after the CIPM meeting in June 2022.

Appendix A – Convocation and Special procedure

O.Ref: MM-CFA-2022-00401

Sèvres, 11 February 2022

Embassies in Paris of the States Parties to the Metre Convention
The President of the *Académie des sciences*
Members of the CIPM

Convocation of the 27th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM)

Pursuant to Article 7 of the Regulations annexed to the Metre Convention, we are writing to inform you that the International Committee for Weights and Measures (CIPM) has decided to convene the 27th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) from Tuesday 15 to Friday 18 November 2022 at the Palais des Congrès de Versailles, 10 rue de la Chancellerie, 78000 Versailles, Yvelines, France.

Pursuant to Article 4 of the Convention, the CGPM will be chaired by Prof. Patrick Flandrin the current President of the *Académie des sciences*.

Following the best practice adopted by other international organizations, the meeting will be held in a "hybrid" format allowing both in-person and remote participation. To this end, the CIPM is proposing that the CGPM adopts a Special Procedure at its 27th meeting to regulate its conduct in this respect. The Special Procedure is attached to this letter. It will be considered during the opening session of the meeting. We would be grateful if States Parties could indicate their support for the adoption of the proposed Special Procedure to the CIPM Secretary, by 30 June 2022 (in an email addressed to cgpm@bipm.org).

A list of the draft resolutions proposed by the CIPM for discussion at the meeting together with a draft agenda are attached to this letter.

States Parties are invited to present their proposals through official diplomatic channels noting the time limit of four (4) months for the distribution of such materials to other States Parties agreed in Resolution 10 adopted by the CGPM at its 9th meeting (1948).

States Parties are asked to present the composition and credentials for their delegations to the Director of the BIPM (in an email addressed to cgpm@bipm.org) no later than two weeks before the opening of the 27th meeting.

The detailed programme for the meeting and other relevant documentation will be available from the BIPM website, which will be updated regularly during the preparation of the meeting: https://www.bipm.org/en/cgpm-2022.

In view of the prevailing global sanitary measures, we will be organizing two on-line briefing sessions to keep participants informed about the plans for the meeting. The CIPM President will also use these sessions as an opportunity to propose plans to convene an informal dotation committee for the CGPM. Information about these will be sent by email.

For the International Committee for Weights and Measures

CIPM Secretary
Dr Takashi Usuda

CIPM President
Dr Wynand Louw

Annex 1 List of draft Resolutions for the 27th meeting of the CGPM

Annex 2 Provisional agenda for the 27th meeting of the CGPM

Appendix Special procedure to regulate the conduct of the 27th meeting of the CGPM

cc

Directors of National Metrology Institutes of States Parties to the Metre Convention

Annex 1

List of draft Resolutions for the 27th meeting of the General Conference on Weights and Measures

A. On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology"

B. On the global digital transformation and the International System of Units

C. On the extension of the range of SI prefixes

D. On the use and future development of UTC

E. On the future redefinition of the second

F. On universal adherence to the Metre Convention

V. On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures

The draft Resolutions are available from the website address:
https://www.bipm.org/en/cgpm-2022/documents

Annex 2

Provisional agenda for the 27th meeting of the General Conference on Weights and Measures

Presentation of credentials by Delegates

1. Opening of the meeting
2. Address by His Excellency the *Ministre de l'Europe et des Affaires Étrangères de la République française*
3. Reply by the President of the CIPM
4. Address by the President of the *Académie des sciences de Paris*, President of the General Conference
5. Nomination of the Secretary of the General Conference
6. Establishment of the list of Delegates entitled to vote
7. Approval of the agenda
8. Special Procedure to allow online participation at the 27th meeting
9. Report of the President of the CIPM on the work accomplished since the 26th meeting of the CGPM
10. Report of the Director of the BIPM on the work accomplished since the 26th meeting of the CGPM

The order and timings proposed for the following agenda items is indicated on the detailed timetable

11. Presentations by representatives of intergovernmental organizations and international bodies
12. Report on relations with intergovernmental organizations and international bodies
13. Reports by Presidents of the Consultative Committees
14. On the report prepared by the International Committee for Weights and Measures on the "Evolving Needs in Metrology" (Draft Resolution A)
15. On the global digital transformation and the International System of Units (Draft Resolution B)
16. On the extension of the range of SI prefixes (Draft Resolution C)
17. On the use and future development of UTC (Draft Resolution D)
18. On the future redefinition of the second (Draft Resolution E)
19. On universal adherence to the Metre Convention (Draft Resolution F)
20. Report from the Chair of the CIPM Sub-Committee on Finance
21. The proposed Work Programme of the BIPM for 2024-2027
22. Nomination of members for a Working Group on the Dotation of the BIPM
23. On the dotation of the International Bureau of Weights and Measures (Draft Resolution V)
24. Proposals by Delegates

25. Votes on all Resolutions
26. Election of the CIPM
27. Other business
28. Plans to celebrate on 20 May 2025 the 150th anniversary of the signing of the Metre Convention
29. Closure of the meeting

Appendix to the Convocation for the 27th meeting of the CGPM

Special Procedure regulating the conduct of the 27th meeting of the CGPM (hereinafter the "Special Procedure"):

I. PURPOSE

1. The unprecedented travel restrictions put in place because of the continued COVID-19 pandemic mean that it is highly unlikely that all States Parties to the Metre Convention will be fully represented in person at the 27th meeting of the CGPM.
2. The purpose of this Special Procedure is to allow the 27th meeting of the CGPM to be held in November 2022 in a hybrid format, allowing both in-person and remote participation of representatives of States Parties and also representatives from Associate States and Economies of the CGPM and invited observers.
3. This Special Procedure is exceptional and does not amount to a modification of the provisions of the Metre Convention and Annexed Regulations.
4. Other International Organizations based in France have used a similar procedure allowing their governing bodies and general assemblies to function despite travel restrictions.

II. CONDUCT OF BUSINESS

5. Every effort will be made to facilitate the full participation of the delegation for all States Parties. In addition to the opportunity to participate in the meeting in the Palais des Congrès (Versailles), a secure and user-friendly online platform will be provided that will also be visible to those participating in person.
6. The President of the 27th meeting of the CGPM will introduce the modalities for participating in the meeting at the beginning of each session and take any necessary measures to facilitate participation online from different time zones.
7. To ensure full participation, whether in person or remotely, the President will invite participants to request the floor. States Parties wishing to present their views on a specific agenda item may choose to contact the President or Secretary of the CGPM in advance of that agenda item to ensure that they will be called upon to speak.
8. During the meeting, contributions and statements from participants may be delivered in person or online and shall be limited to a maximum of five (5) minutes. Pre-recorded video statements, also limited to five (5) minutes, may be submitted in advance of the opening of the 27th meeting and broadcast in lieu of a live intervention. These video statements and all other contributions made online shall form part of the official records of the meeting.
9. The BIPM staff shall provide the necessary administrative, technical and logistical assistance for the preparation and conduct of the 27th meeting in a hybrid format.

III. ADOPTION OF RESOLUTIONS AND DECISIONS

10. In accordance with the established practice at CGPM meetings, the President of the CGPM will work with States Parties to establish a general consensus on resolutions and decisions. This procedure consists of reaching a general consensus characterized by the absence of sustained opposition to substantial issues, by a process that involves seeking to take into account the views of all States Parties and to reconcile any conflicting views.

11. At the conclusion of each discussion, the President shall therefore ask the Head of each delegation to indicate by raising a hand whether they are for, or against, the resolution or whether they abstain. Every effort should be made to build consensus and to adopt resolutions at the meeting using this procedure.

12. At some previous meetings, the CGPM has chosen to adopt particular resolutions through a roll-call vote of States Parties by asking each delegation to indicate their vote when called. Such a procedure shall be avoided because of the logistical difficulty of ensuring that the Head of every delegation is available when the roll call is held during a hybrid meeting.

13. During the introduction of each draft resolution, the President will indicate which of the above procedures he proposes to use at the conclusion of the discussion.

IV. SCOPE OF RESOLUTIONS OR DECISIONS TO BE ADOPTED

14. Taking particular account of the challenges presented in adopting resolutions and decisions by the procedures detailed above, the CIPM proposes that the 27th meeting of the CGPM addresses resolutions or decisions:

    i. that are essential for the delivery of the BIPM Work Programme for 2024-2027, such as those concerning the annual dotation of the BIPM.

    ii. that are time-sensitive and required to meet the changing needs and demands in different areas of metrology, and upon which a consensus can easily be reached.

15. The text of the Convocation of the 27th meeting of the CGPM therefore includes draft resolutions concerning the above-mentioned matters.

16. Other matters upon which a consensus has not been reached among the 63 Member States could be discussed and reported during the 27th meeting of the General Conference.

V. ELECTIONS

17. Pursuant to Article 7 of the Annexed Regulations, the CGPM conducts elections using a secret ballot. An on-site secret ballot will be organized, with the support of a third-party voting service, for the election of the members of the CIPM and of the Committee for the Election of the CIPM (CEC). All efforts shall be made to ensure these elections are carried out in-person and expeditiously using reliable and secure voting tools, as appropriate.

VI. IMPLEMENTATION OF THE SPECIAL PROCEDURE

18. The decision to proceed according to the Special Procedure lies solely with States Parties. States Parties should therefore endorse and formally approve the Special Procedure described above at the opening session of the 27th meeting of the CGPM.

Note on the version published on 22 July 2022.

This version includes amendments to the text relating to the scope of discussions (Section IV) and the voting procedure (Section V) following comments submitted by Member States.

Appendix B – Proposals for the Work Programme of the BIPM for the four years 2024-2027

The document "Proposals for the Work Programme of the BIPM for the four years 2024-2027" is published in electronic form only and is available on the BIPM website dedicated page.

Liste des sigles utilisés dans le présent volume
List of acronyms used in the present volume

ACDP	Advisory Committee on Dangerous Pathogens
ACES	European Atomic Clock Ensemble in Space
AFM	Atomic force microscopy
AFRIMETS	Système intra-africain de métrologie/Intra-African Metrology System
AGT	Acoustic Gas Thermometry
AI	Artificial intelligence
AIE	Agence internationale de l'énergie
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japon/Japan)
API	Application Programming Interface/Interface de programmation d'applications
APMP	Asia Pacific Metrology Programme
ARN	Acide ribonucléique
BIH	Bureau international de l'heure
BIML	Bureau international de métrologie légale/International Bureau of Legal Metrology
BIPM	Bureau international des poids et mesures/International Bureau of Weights and Measures
BNCT	Boron Neutron Capture Therapy/Thérapie par capture de neutrons par le bore
CASCO	ISO Committee on Conformity Assessment
CBKT	Capacity Building and Knowledge Transfer/Renforcement des capacités et transfert des connaissances
CC	Consultative Committee of the CIPM
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations/Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration
CCDM	Comité consultatif pour la définition du mètre/Consultative Committee for the Definition of the Metre
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde/Consultative Committee for the Definition of the Second
CCE	Comité consultatif d'électricité

CCEM	Comité consultatif d'électricité et magnétisme/Consultative Committee for Electricity and Magnetism
CCL	Comité consultatif des longueurs/Consultative Committee for Length
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées/Consultative Committee for Mass and Related Quantities
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie/Consultative Committee for Photometry and Radiometry
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie/Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology
CCRI	Comité consultatif des rayonnements ionisants/Consultative Committee for Ionizing Radiation
CCS	Carbon Capture and Storage
CCT	Comité consultatif de thermométrie/Consultative Committee for Thermometry
CCTF	Comité consultatif du temps et des fréquences/Consultative Committee for Time and Frequency
CCU	Comité consultatif des unités/Consultative Committee for Units
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
CEC	Committee for the Election of the CIPM
CEEMS	Countries and Economies with Emerging Metrology Systems/Pays et économies dotés de systèmes de métrologie émergents
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites/Comité sur les satellites d'observation de la Terre
CGPM	Conférence générale des poids et mesures/General Conference on Weights and Measures
CIE	Commission internationale de l'éclairage/International Commission on Illumination
CIML	Comité international de métrologie légale/International Committee of Legal Metrology
CIMO	WMO Commission for Instruments and Methods of Observation/Commission des instruments et des méthodes d'observation de l'OMM
CIPM	Comité international des poids et mesures/International Committee for Weights and Measures
CIPM MRA	Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM/CIPM Mutual Recognition Arrangement
CMC	Calibration and Measurement Capability/Aptitude en matière de mesure et d'étalonnage
CMM	Coordinate measuring machine
CMS	Coordinate measuring system

CMS/ITRI	Center for Measurement Standards/Industrial Technology Research Institute (Taipei chinois/Chinese Taipei)
CNES	Centre national d'études spatiales (France)
CNRC	Conseil national de recherches Canada (Canada)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique (France)
CNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
COOMET	Coopération métrologique entre les États d'Europe centrale/Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions
COP	Conference of the Parties/Conférence des parties
CRM	Certified reference material
CSAR	Cryogenic Solar Absolute Radiometer
CSR	Corporate social responsibility
CTBTO	Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization
DBT	Doppler Broadening Thermometry
DCC	Digital calibration certificate
DCGT	Dielectric Constant Gas Thermometry
DCMAS Network	Network on Metrology, Accreditation and Standardization for Developing Countries/Réseau de métrologie, d'accréditation et de normalisation pour les pays en développement
DI	Designated Institute
DMRP	IAEA Dosimetry and Medical Radiation Physics Section
DOI	Digital Object Identifier
DRUM	Digital Representation of Units of Measurement
dPCR	reverse transcription digital-PCR
DSAC	NASA Deep Space Atomic Clock
DTG	OIML Digital Task Group
ECV	Essential Climate Variable
EFTF	European Frequency and Time Forum
eGFR	Estimated glomerular filtration rate
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EIT-90	Échelle internationale de température de 1990
EMPA	Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology/Laboratoire fédéral suisse d'essais des matériaux et de recherche (Suisse/Switzerland)
ESA	European Space Agency/Agence spatiale européenne
ESIR	Extended SIR/SIR étendu

ESRL	Earth System Research Laboratories
ESTEC	European Space Research and Technology Centre
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable/Données faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations/Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FDR	Fundamental Data Record
FRM	Fiducial Reference Measurement
FTIR	Fourier Transform Infra-Red Spectrometry/Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
GAP	WHO Global Action Plan
GAW	WMO Global Atmosphere Watch
GCOS	WMO Global Climate Observing System
GCW	WMO Global Cryosphere Watch
GDP	Gross domestic product
GDPFS	WMO Global Data Processing and Forecasting System
GEO	Group on Earth Observations/Groupe d'observation de la Terre
GES	Gaz à effet de serre
GHG	Greenhouse gas
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOOS	WMO Global Ocean Observing System
GPS	Global Positioning System
GSICS	Global Space-based Inter-Calibration System
GST	Galileo System Time
GULFMET	Gulf Association for Metrology
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement/Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
HCFC	Hydrochlorofluorocarbon/Hydrochlorofluorocarbure
HFC	Hydrofluorocarbon/Hydrofluorocarbure
HIFU	High Intensity Focused Ultrasound
HITU	High Intensity Therapeutic Ultrasound
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAPWS	International Association on Properties of Water and Steam

ICHCLR	International Consortium for Harmonization of Clinical Laboratory Results
ICSH	International Council for Standardization in Haematology
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission/Commission électrotechnique internationale
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service/Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine
IGO	Intergovernmental organization
IIOC	Independent International Organisation for Certification
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
IMEKO	International Measurement Confederation
IMS	International Monitoring System/Système de surveillance international
IMU	International Mathematical Union
INetQI	International Network on Quality Infrastructure/Réseau international sur l'infrastructure de la qualité
INFCOM	Services Commission and an Infrastructure Commission/Commission des services et la commission des infrastructures
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Brésil/Brazil)
INTI	*Instituto Nacional de Tecnología Industrial* (Argentine/Argentina)
IO	International organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPK	International Prototype of the Kilogram
IPQ	*Instituto Português da Qualidade* (Portugal)
IQNET	International Certification Network
ISC	International Science Council/Conseil international des sciences
ISO	International Organization for Standardization/Organisation internationale de normalisation
ISO/CASCO	ISO Committee on Conformity Assessment/Comité de l'ISO pour l'évaluation de la conformité
ITRF	International Terrestrial Reference Frame/Système international de référence terrestre
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector

IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
IVD	In-Vitro Diagnostic
IVDD	In-Vitro Diagnostic Directive
IVDR	In-Vitro Diagnostic Device Regulation
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology/Comité commun pour les guides en métrologie
JCGM WG1	JCGM Working Group on the Expression of Uncertainty in Measurement
JCGM WG2	JCGM Working Group on the International Vocabulary of Metrology
JCRB	Joint Committee of Regional Metrology Organizations and the BIPM/Comité mixte des organisations régionales de métrologie et du BIPM
JCTLM	Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine/Comité commun pour la traçabilité en médecine de laboratoire
JNT	Johnson Noise Thermometry
JRC	European Commission's Joint Research Centre/Centre commun de recherche de la Commission européenne
JV	*Justervesenet* (Norvège/Norway)
KC	Key comparison
KCDB	BIPM Key comparison database/Base de données du BIPM sur les comparaisons clés
KCRV	Key Comparison Reference Value/Valeur de référence d'une comparaison clé
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science (République de Corée/Republic of Korea)
LED	Light-emitting diode
LHC	Large Hadron Collider/Grand collisionneur de hadrons
LIGO	Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory/Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser
LNE	Laboratoire national de métrologie et d'essais (France)
LoD	Limit of detection
LPED	Laboratoires primaires d'étalonnage pour la dosimétrie de l'AIEA
LSED	Laboratoires secondaires d'étalonnage pour la dosimétrie de l'AIEA
MEMS	Microelectromechanical System
METAS	Institut fédéral de métrologie/Federal Institute of Metrology (Suisse/Switzerland)
MMM	Measurement Methods Matrix/Matrice des méthodes de mesure
MS	Mass spectrometry

NAAT	Nucleic acid amplification tests
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCSLI	NCSL (National Conference of Standards Laboratories) International
NIBSC	National Institute for Biological Standards and Control (Royaume-Uni/UK)
NIM	National Institute of Metrology (Chine/China)
NIMT	National Institute of Metrology - Thailand (Thaïlande/Thailand)
NIS	National Institute of Standards (Égypte/Egypt)
NIST	National Institute of Standards and Technology (États-Unis d'Amérique/USA)
NMI	National Metrology Institute
NMIJ	National Metrology Institute of Japan (Japon/Japan)
NMISA	National Metrology Institute of South Africa (Afrique du Sud/South Africa)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPL	National Physical Laboratory (Royaume-Uni/UK)
NRC	National Research Council Canada (Canada)
NSC-IM	National Scientific Centre "Institute of Metrology" (Ukraine)
NTP	Network Time Protocol
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD	Objectifs de développement durables
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OIML	Organisation internationale de métrologie légale/International Organization of Legal Metrology
OIML-CS	OIML Certification System
OMC	Organisation mondiale du commerce
OMM	Organisation météorologique mondiale
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONU	Organisation des Nations Unies
ONUDI	Organisation des Nations Unies pour le développement industriel
OTC	Obstacles techniques au commerce
OTICE	Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires
PCR	Polymerase chain reaction
PIB	Produit intérieur brut
PLTS-2000	Provisional Low Temperature Scale of 2000/Échelle provisoire des basses températures de 2000

PMOD/WRC	*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos* and World Radiation Center/Observatoire physico-météorologique de Davos et Centre mondial du rayonnement
PTB	*Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (Allemagne/Germany)
PTH	Parathyroid hormone
PTP	Precision Time Protocol
QHR	Quantum Hall resistance
QI	Quality Infrastructure
RLMO	Regional Legal Metrology Organization
RMO	Regional Metrology Organization
RNA	Ribonucleic acid
RoP	Rules of procedure
RT-PCR	Reverse Transcriptase - Polymerase chain reaction
SASO-NMCC	Saudi Standards, Metrology and Quality Organization/National Measurement and Calibration Center (Arabie saoudite/Saudi Arabia)
SDGs	United Nations Sustainable Development Goals
SI	Système international d'unités/International System of Units
SIO	Système d'information de l'OMM
SIR	Système international de référence/International Reference System
SIRTI	SIR transportable instrument/Instrument de transfert du SIR
SITsat	SI Traceable Satellite
SMISO	Système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM
SMOC	Système mondial d'observation du climat de l'OMM
SMOO	Système mondial d'observation de l'océan de l'OMM
SMTDP	Système mondial de traitement des données et de prévision de l'OMM
SOFAR	Sound Fixing and Ranging
SOFF	WMO Systematic Observation Financing Facility/Mécanisme de financement des observations systématiques de l'OMM
SOHO	Système d'observation hydrologique de l'OMM
SSDL	Secondary Standard Dosimetry Laboratory
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats/Forces, faiblesses, opportunités et menaces
TAAN	Test d'amplification des acides nucléiques
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TBT	Technical barrier to trade
TC	Technical Committee

TDP	Thematic Data Product
TEM	Transmission electron microscopy
TG	Task Group
TRUTHS	Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial- and Helio- Studies
TT	Temps terrestre/Terrestrial Time
TÜBİTAK UME	*TÜBITAK Ulusal Metroloji Enstitüsü* (Türkiye)
UFFC	Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society
UIT	Union internationale des télécommunications
UIT-R	Union internationale des télécommunications, secteur Radiocommunications
UN	United Nations
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
UTC	Coordinated Universal Time/Temps universel coordonné
UTCr	UTC rapide/Rapid UTC
VAG	Veille de l'atmosphère globale de l'OMM
VAMAS	Versailles Project on Advanced Materials and Standards
VCE	Variables climatiques essentielles
VIM	Vocabulaire international de métrologie/International Vocabulary of Metrology
VMC	Veille mondiale de la cryosphère de l'OMM
WG	Working Group
WHO	World Health Organization
WHOS	WMO Hydrological Observations System
WIGOS	WMO Integrated Global Observing System
WIS	WMO Information System
WMO	World Meteorological Organization
WTO	World Trade Organization
XCT	X-ray Computed Tomography
XRCD	X-ray crystal density/Méthode de mesures de masse volumique de cristaux par rayons x

ISBN 978-92-822-2288-1
ISSN 1016-5893
Achevé : avril 2024