



HAL
open science

The origins of the metric system in France and the Metre Convention of 1875, which opened the way to the International System of Units and its revision in 2018

Suzanne Débarbat, Terry Quinn

► **To cite this version:**

Suzanne Débarbat, Terry Quinn. The origins of the metric system in France and the Metre Convention of 1875, which opened the way to the International System of Units and its revision in 2018. *Comptes Rendus. Physique*, 2019, 20 (1-2), pp.6-21. 10.1016/j.crhy.2018.12.002 . hal-02164933

HAL Id: hal-02164933

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-02164933>

Submitted on 25 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



The new International System of Units / Le nouveau Système international d'unités

Les origines du système métrique en France et la Convention du mètre de 1875, qui a ouvert la voie au Système international d'unités et à sa révision de 2018

The origins of the metric system in France and the Metre Convention of 1875, which opened the way to the International System of Units and its revision in 2018

Suzanne Débarbat*, Terry Quinn¹

Observatoire de Paris, LNE-SYRTE, UMR 8630 CNRS, 61, avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Disponible sur Internet le 14 février 2019

Mots-clés :

Système métrique décimal
Convention du mètre
SI
Académie des sciences
Bureau des longitudes
Bureau international des poids et mesures

Keywords:

Decimal metric system
Metre Convention
SI units
Académie des sciences
Bureau des longitudes
Bureau international des poids et mesures

R É S U M É

L'importante révision du Système international d'unités (SI), qui est intervenue lors de la 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), en novembre 2018, constitue l'aboutissement de près de 250 années de développement des idées quant à la meilleure façon de définir un système d'unités de mesures qui soit le plus étroitement lié à la nature. Dans la première partie, nous évoquons l'histoire des unités ayant abouti à la création du système métrique décimal en France à la fin du XVIII^e siècle. Dans la seconde partie, nous décrivons l'initiative du gouvernement français ayant conduit à la signature de la Convention du mètre le 20 mai 1875, avec la mise en place des éléments principaux devant permettre la collaboration internationale, d'où résulte la révision du SI qui a été adoptée en novembre 2018.

© 2019 Publié par Elsevier Masson SAS au nom de Académie des sciences. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

A B S T R A C T

The important revision of the International System of Units (SI) that has taken place at the 26th General Conference on Weights and Measures in November 2018 is the culmination of some 250 years of development of ideas on how best to create a system of units of measurement closely linked to nature. In part 1 of this article, we outline the early history of units that led up to the creation of the decimal metric system in France at the end of the 18th century. In part 2, we describe the initiative of the French Government that led to the signing of the Metre Convention on 20 May 1875, which established the essential

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : Suzanne.Debarbat@obspm.fr (S. Débarbat).

¹ Emeritus Director of the Bureau international des poids et mesures, 92, rue Brancas, 92310 Sèvres, France.

formal basis for the future international collaborations that have resulted in the revision of the SI adopted in November 2018.

© 2019 Publié par Elsevier Masson SAS au nom de Académie des sciences. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Les origines du système métrique en France (SD)

Le 22 décembre 1666 a lieu la première réunion de l'Académie royale des sciences, récemment créée sur ordre de Louis XIV, mise en place par son ministre Colbert, peut-être sous l'influence de son secrétaire pour les sciences et les arts, Charles Perrault.

1.1. À l'Académie des sciences, des précurseurs d'un système d'unités unifiées

Cette création, comme avait dû l'être celle de la *Royal Society* de Londres en 1660, devait beaucoup aux réunions tenues, depuis le premier quart du XVII^e siècle, en Italie puis – un peu plus tard – en France. Certes, Pierre Petit avait répondu à l'appel de Louis XIV, ainsi qu'il l'indique au début de son ouvrage *Dissertation sur la nature des comètes* paru en 1665 ; mais l'adresse au roi d'Adrien Auzout, plus courte et plus diplomatique, groupant la création d'une *Compagnie des sciences et des arts* et d'un *Observatoire*, s'était révélée efficace.

L'acte d'achat du terrain pour établir un lieu de réunion destiné à l'Académie date du 7 mars 1667 ; il fait suite à la requête de la construction de « quelque lieu pour faire à l'avenir toutes sortes d'observations célestes et qu'elle [le] fera garnir de tous les instruments nécessaires à cet effet ». Deux domaines venaient de connaître un développement important. Aux Pays-Bas, Christiaan Huygens innovait avec ses horloges à pendule (1655–1656) pour le repérage de l'instant des phénomènes, ce qui l'avait fait solliciter pour appartenir à cette académie dès son origine. En France, Jean Picard et Adrien Auzout avaient su remplacer, sur les secteurs, alidades et pinnules par des lunettes de Galilée et, quasi simultanément, les équiper de micromètres à fil.

L'Observatoire royal, dont la position, très en dehors de Paris, afin de faciliter les observations astronomiques, voit son orientation nord-sud officiellement fixée le 21 juin 1667 par les académiciens, son axe de symétrie étant établi par observation du passage du Soleil à ce qui devait devenir le méridien de référence pour la France.

Louis XIV et Colbert constatent que la carte de France existante ne suffit pas aux besoins d'un pays de la seconde moitié du XVII^e siècle ; les astronomes reçoivent ordre d'en réaliser une de meilleure qualité. Les Académiciens vont devoir s'exécuter et, sans attendre la fin de la construction du bâtiment, Picard leur présente un projet dès le 31 juillet 1669.

Au début de septembre 1668, Auzout a reçu, dédié par Gian Domenico Cassini de Bologne, l'ensemble des prédictions d'éclipses des quatre satellites de Jupiter découverts par Galilée et pour lesquels il a, avec succès, pu étudier les phénomènes observés depuis près d'un siècle par différents observateurs d'Italie ou du Sud de la France. De même que les éclipses de Lune, les phénomènes affectant ces objets permettent de déterminer l'une des deux coordonnées terrestres nécessaires à l'établissement de cartes terrestres, à savoir la longitude. L'autre coordonnée terrestre, la latitude, pouvait, dans l'hémisphère nord, être obtenue par l'observation de l'Étoile polaire.

Ainsi se trouvaient réunis tous les éléments nécessaires à la cartographie requise par le roi. Ce qui explique les développements que vont mener les astronomes, tant en astronomie qu'en géodésie, et en particulier l'opération de mesure de la Terre que Picard va exécuter après avoir conçu les instruments nécessaires. D'une part, il observe les azimuts des angles aux différents sommets de la triangulation qu'il va établir en 1669 et 1670 entre Sourdon, près d'Amiens et Malvoisine, près de La Ferté-Alais. Picard met au point, pour ses mesures géodésiques, un quart de cercle à deux lunettes, qu'il emploie également pour obtenir les différences d'altitude de ses lieux d'observation. D'autre part, pour la partie astronomique, il utilise un secteur d'environ une toise de long et dont le limbe gradué est de l'ordre de vingt degrés ; ainsi, il peut s'affranchir de la partie principale de la réfraction due à l'atmosphère terrestre. Cette opération lui permet de fixer l'orientation du méridien de l'Observatoire royal, sa longueur entre Sourdon et Malvoisine, et de faire connaître les dimensions de la Terre.

À cette occasion, Picard note que les unités de longueur ne sont pas uniformes d'une zone à une autre, tandis que lui-même utilise, pour ses mesures, la même *toise* de référence. En revanche, son pendule, à la précision de ses mesures, oscille avec une période invariable. Ces remarques le conduisent à proposer, en vue d'une unification des références pour les longueurs, celle du pendule battant la seconde, conséquence logique de ses observations sur un arc de méridien aussi court, d'autant que, lorsqu'il publie son ouvrage fondamental *La Figure de la Terre* en 1671, Isaac Newton n'a pas encore publié ses *Principia*.

1.2. Le siècle des Lumières et la Révolution française

L'expression française *siècle des Lumières* recouvre la partie du XVIII^e siècle au cours de laquelle sont apparus des « philosophes », ainsi que l'on désignait alors tous ceux qui, scientifiques ou littéraires, développaient des idées novatrices ayant mûri pendant le dernier quart du siècle précédent.

Tous les domaines devaient se trouver atteints et, notamment, ceux qui touchent à la vie de chacun et de tous les jours. Dans ces derniers, et pour le développement des échanges, les poids et mesures ont un rôle à la fois spécifique et de grande généralité. L'Académie des sciences se montre particulièrement active par ses membres relevant de plusieurs disciplines ; l'on peut en juger par la suite des expéditions qu'elle soumettra aux pouvoirs du moment.

Voltaire, ardent défenseur de Newton, aura un rôle important de diffusion des idées nouvelles, avec le concours de M^{me} du Châtelet et de ceux qui l'ont aidée à sa traduction des *Principia* ; ils sauront exploiter les idées issues de la loi de la gravitation. Les missions lointaines vont se succéder sous l'égide de l'Académie des sciences, au Pérou de l'époque, de nos jours l'Équateur, avec départ en 1735 de La Condamine, Bouguer et d'autres. L'année suivante, 1736, départ pour la Laponie avec Maupertuis, Clairault, Le Monnier... , de nos jours à la limite entre la Suède et la Finlande, au plus près du pôle nord.

Le retour de cette dernière expédition, en 1737, confirmant l'aplatissement de la Terre, entraîne en 1739/1740 une vérification de la Méridienne de France. Contrairement aux conclusions des Cassini I et II, fondées sur des mesures groupant plusieurs campagnes indépendantes, avec des observateurs et des instruments différents, celles publiées par César-François Cassini, Cassini III, confirment les conclusions de la campagne de Laponie. Les mesures de 1739/1740 sont, en effet, pour leur presque totalité, issues des observations de Nicolas Lacleille, équipé lui aussi d'instruments nouveaux, vraisemblablement plus précis, les « artistes » (à l'époque les fabricants d'instruments scientifiques de précision) ayant mis en œuvre des techniques nouvelles. L'expédition du Pérou ne pourra rentrer en France qu'en 1744, et même un peu plus tard pour certains de ses membres ; elle confirme l'aplatissement de la Terre.

En novembre 1747, Charles-Marie de La Condamine présente à l'Académie des sciences un *Nouveau projet d'une mesure invariable propre à servir de mesure commune à toutes les Nations* ; il rappelle que cette proposition avait dû être soumise « à la recherche du ministère » par un autre membre de l'Académie, Charles François de Cisternay de Fay ou du Fay, décédé en 1739. La Condamine était alors au Pérou, d'où il n'est rentré qu'au début de 1745 et, dans son discours « lu à l'Assemblée publique du 24 Avril 1748 », il revient sur sa proposition de la mesure tirée du pendule à seconde. La Condamine rappelle que les expéditions de Cayenne, du Pérou, de Laponie, ont apporté des constatations qui l'ont amené à fixer son choix sur la longueur du pendule à l'équateur terrestre, de préférence au pendule battant la seconde à la latitude de 45°. Il suffit alors, pour rétablir cette dernière longueur, d'avoir déterminé la différence à n'importe quelle latitude. Quant au nom à donner à la nouvelle référence de longueur, il propose un qualificatif tel que physique, horaire, astronomique, universel, etc.

Bientôt, Lacleille est envoyé dans l'hémisphère sud ; il demeurera un peu plus de deux années en Afrique du Sud, se rendant également à l'île de France (île Maurice) et à l'île Bourbon (La Réunion), s'arrêtant même, au retour, sur l'île de l'Ascension. Parti en 1750, il rentre en 1754, rapportant un catalogue de dix mille étoiles et des idées relatives à une éphéméride nautique qui inspirera les Britanniques pour la création de leur *Nautical Almanac* en 1767.

Tous ces savants qui ont contribué aux mesures précédemment décrites n'ont pas manqué de remarquer les complications générées par la diversité des références ; La Condamine, qui remarque lui aussi, comme ses confrères, l'importance d'une unification des mesures, paraît avoir été le premier à reprendre l'idée de l'unification des unités.

Cependant, dès 1746 et de plusieurs côtés, l'on s'inquiète de la variation de certaines mesures avec le temps. À Nantes, par exemple, des différences apparaissent au sujet de l'aune des merciers, entraînant une intervention rapportée dans les Mémoires de l'Académie des sciences sollicitée par le comte Jean-Frédéric Phélypeaux de Maurepas. Un peu plus tard, le 29 juillet 1758, La Condamine intervient à l'Académie. Puis, dans une longue discussion, il expose finalement ses « Remarques sur la Toise-Étalon du Châtelet » sous-titrées « Et sur les diverses Toises employées aux mesures des Degrés terrestres & à celle du Pendule à seconde ». Le texte s'achève sur les « Notes sur ce Mémoire » publiées en 1776, après sa mort (1774), où il est indiqué qu'il y eut opposition de la part de Jean-Jacques Dortous de Mairan, mais que le 16 mai 1766 le roi (Louis XV) avait fait une déclaration par laquelle Mathieu Tillet, de l'Académie des sciences, était chargé de faire reproduire une soixantaine d'exemplaires de la Toise dite du Pérou (conservée, encore aujourd'hui, à l'Observatoire de Paris), ainsi que de l'aune de Paris et du poids de marc « à envoyer au Châtelet et aux Procureurs des différents parlements ». L'envoi avait également été fait en Guyane, en Corse et dans plusieurs villes d'Europe, l'original étant conservé par l'Académie.

Les propos des savants, l'engagement de l'Académie, les difficultés rencontrées par la population contribuent à la convocation des États généraux au début de l'année 1789. À cette occasion parviennent à cette assemblée des cahiers de doléances, dans lesquels – entre autres choses – figurent des remarques relevant de l'unification des mesures. Par le mot *mesures*, à l'époque, ce sont surtout les longueurs qui sont considérées, ainsi que les poids, tous objets d'usage courant pour la population du royaume (Louis XVI est monté sur le trône en 1774). C'est donc désormais l'expression « poids et mesures » qui est employée. Les esprits se trouvaient mûrs et c'est Charles-Maurice de Talleyrand-Périgord, évêque d'Autun, élu député, qui présente à l'Assemblée nationale constituante, le 9 mars 1790, sous forme imprimée, le projet d'un système de poids et mesures dont l'étalon serait le pendule battant la seconde à Paris. Le discours de Talleyrand comprend des passages quelque peu enflammés qui pourraient être de lui. Mais les parties plus scientifiques seraient le fait de Marie-Jean-Antoine Caritat de Condorcet, alors secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, ou de Joseph-Jérôme Lefrançois de Lalande, qui commençait à être bien connu dans différents milieux.

Le 8 mai 1790, un décret rédigé et soumis au roi, sanctionné le 22 août 1790, mentionne, notamment, le concours de l'Angleterre pour la fixation des unités naturelles de mesure et de poids, la rédaction d'ouvrages usuels et leur diffusion. En outre, il est prévu que, six mois après, « les anciennes mesures seraient abolies et remplacées par les nouvelles ». C'était aller bien vite en besogne... Cependant, dès le 27 octobre 1790, une commission nommée par l'Académie des sciences, comprenant Borda, Lagrange, Lavoisier, Tillet et Condorcet, présente un rapport qui assujettit la monnaie à l'échelle décimale.



Fig. 1. Portraits de Méchain et Delambre. Chacun est représenté, dans ces portraits commandés par l'amiral Mouchez, alors directeur de l'Observatoire de Paris, pour en orner la rotonde ouest. Y figurent l'ouvrage *Base du Système métrique décimal*; main gauche pour Méchain (daté 1882/1883) et posé sur la table, ouvert à sa page de titre, pour Delambre (daté 1879), un mètre en main, un kilogramme étant posé sur la table. © Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

Une autre commission de l'Académie, composée de Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet, rapporte, le 19 mars 1791, sur le choix d'une unité de mesure : une fraction de l'équateur terrestre ou de méridien, la longueur du pendule à seconde.

Le 26 mars 1791, une lettre signée par Condorcet adresse les conclusions, assorties d'éléments sur les opérations à exécuter, à l'Assemblée nationale. Talleyrand présente un projet de décret, sanctionné par Louis XVI le 30 mars suivant. Les commissions d'exécution sont établies : Triangulation et latitudes (Cassini, Pierre-François Méchain, Adrien-Marie Legendre); Bases (Gaspard Monge et Jean-Baptiste Meusnier); Longueur du pendule (Jean-Charles de Borda et Charles Augustin Coulomb); Poids du décimètre cube d'eau (Antoine Lavoisier et René Haüy); Comparaison de ces mesures de Paris avec celles de provinces. Différents motifs modifieront ces compositions et, également, la tâche des uns et/ou des autres.

À la mise en place effective des responsables des opérations, se trouvent finalement nommés Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain [1] (Fig. 1) pour la mesure de l'arc de méridien joignant Dunkerque à Barcelone, d'un niveau de la mer à l'autre; ils furent également chargés de la mesure des bases, tandis que Borda et Lavoisier [2] étudiaient les règles de Borda à employer pour ces dernières mesures. La masse du volume d'eau, confiée à Lavoisier et Haüy, fut achevée par Louis Lefèvre-Gineau après la disparition de Lavoisier, guillotiné. Les comparaisons envisagées ont été pratiquement abandonnées, tandis que Borda et Cassini s'employaient aux mesures liées au pendule.

En mai 1792, quatre cercles répétiteurs avaient pu être fabriqués par Étienne Lenoir pour les observations géodésiques et astronomiques, ainsi que divers instruments pour les autres opérations. Ainsi, pour leurs mesures de géodésie astronomiques, Delambre et Méchain disposaient chacun de deux cercles *dits* de Borda-Lenoir, dont le premier avait tiré l'idée du cercle entier de Tobias Mayer et que le second avait eu beaucoup de mal à réaliser; mais ce sera un beau succès puisque, dans les années 1930, le Service géographique de l'armée (SGA) l'employait encore. En 1940, l'Institut géographique national (IGN) a pris le relais du SGA, ce qui explique que l'on trouve dans ses collections nombre d'instruments de caractère géodésique.

1.3. Le système métrique décimal

Tandis que les opérations à réaliser à Paris se développaient et allaient bientôt s'achever, les hommes de terrain, Delambre, Méchain, et leurs collaborateurs, se préparaient pour leur opération de triangulation. La Méridienne de France, œuvre de Picard, des Cassini, des Maraldi, de Lacaille et de tous leurs collègues, devait être parcourue par l'un (Delambre) à partir de l'extrémité nord, tandis que l'autre (Méchain) devait partir de l'extrémité sud (Fig. 2).

Ces deux hommes, confrontés aux vicissitudes des moments troublés de l'époque, se sont trouvés aux prises avec les habitants des localités parcourues pour mener les mesures depuis des points élevés retenus pour leur triangulation. Les repères, parfois en tissu blanc, évoquaient le drapeau royal, qui venait d'être mis à mal. Cependant, leur choix conservait, chaque fois que possible, et surtout pour Delambre parti de Dunkerque, les sommets de Picard, des Cassini et de Lacaille, méridien déjà parcouru à deux reprises, mais seulement jusqu'aux Pyrénées; Méchain, en charge de la partie sud, avait donc plus à faire, d'autant qu'il avait à atteindre et franchir la montagne.

Les académiciens avaient, finalement, retenu la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre; par un décret du 1^{er} août 1798, le premier article décide que « le nouveau système des poids et mesures, fondé sur la mesure du méridien de la Terre, et la division décimale, servira uniquement dans toute la République ». Entre autres décisions figure également : « Il sera fait, par des artistes au choix de l'Académie des sciences, des étalons des nouveaux poids et mesures qui seront envoyés à toutes les administrations des départements et districts. » L'unité de poids se déduira du mètre, puisque devant s'obtenir par un décimètre cube d'eau à la température de la glace fondante.

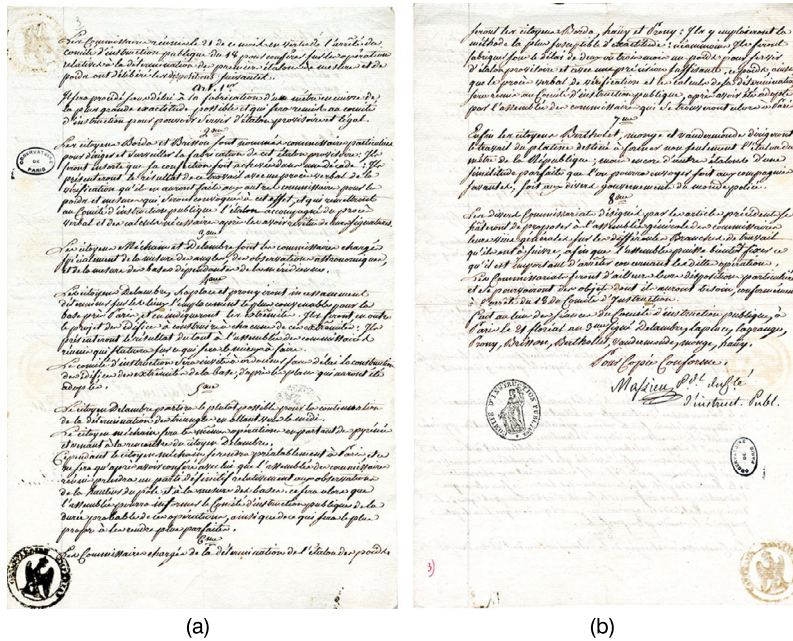


Fig. 2. Délibérés de la commission du 21 floréal an 3 (en 2 pages, a et b). Lors de cette réunion, qui s'est tenue le 10 mai 1795, la commission, réunie en vertu de l'arrêté du Comité d'instruction publique du 18 floréal précédent, établit un texte relatif à la détermination des premiers étalons de mesure et de poids en huit articles. L'article 1^{er} est relatif au mètre provisoire et légal; les articles suivants, 2, 3, 4 et 5 nomment Borda et Brisson, Méchain et Delambre. Le suivant, 6, nomme Borda, Haüy et Prony pour le poids, tandis que Bertholet, Monge et Vandermonde dirigeront le travail du platine. Des dispositions finales constituent le 8^e et dernier article. Y figurent les signatures de Delambre, Laplace, Lagrange, Prony, Brisson, Bertholet, Vendermonde, Monge et Haüy. Pour copie conforme Mathieu, astronome de l'Observatoire de Paris, étant président du Comité d'instruction publique. © Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

Il est peu connu que le nom de mètre provient d'Auguste-Savinien Leblond, mathématicien et naturaliste, petit-neveu de Guillaume Leblond, mathématicien qui fut *Maître de Mathématiques des Enfants de France*, souvent confondu avec son neveu. Ce dernier, ayant occupé d'autres fonctions, se trouve nommé à l'une des commissions de l'Académie des sciences, celle qui comprenait les « citoyens David, Moitte, Leblond, Monge, La Place, Delambre, Lévêque et Gosselin ».

Dans l'intervalle, ce Leblond avait, le 12 mai 1790, lu à l'Académie [3] une communication, « Sur la fixation d'une mesure et d'un poids », non publiée à l'époque. L'année suivante, il la « dépose sur le papier » sous la forme d'un opuscule de quinze pages [4]; il y discute ce qui fait l'objet des préoccupations du moment, rappelant la position de La Condamine. À propos du nom de la *nouvelle mesure* [au sens de longueur], il écrit : « Que celui-ci, que cette *mesure* fixe, universelle, fondamentale, reçoive le nom si expressif, je dirois presque si françois, de *mètre*. »

Si ce texte ne figure pas dans les publications de cette Académie, cela tient au fait qu'elle vivait des moments difficiles, lesquels entraîneront sa suppression le 8 août 1793, avant le renouveau, en 1795, dans le cadre de l'Institut national des sciences et des arts, composé de trois classes : des sciences physiques et mathématiques, des sciences morales et politiques, de littérature et des beaux-arts. Deux lois lui sont consacrées, celle du 5 fructidor an III (22 août 1795) et celle du 3 brumaire an IV (25 octobre 1795). Dans sa publication de 1791, Leblond avait ajouté un « P.S. du 15 Juin 1791 » il se réjouit du choix fait par l'Académie liée à la dimension de la Terre, « comme j'avois eu le bonheur de le pressentir ». Leblond ajoute : « C'est un motif de plus pour moi de me permettre aucun changement et de livrer mon travail à l'impression, tel qu'il est dans les registres de l'Académie. » Pour le poids, l'Académie avait proposé le mot *grave*, repris par la décision du 1^{er} août 1793; il sera remplacé, le 18 germinal an III (7 avril 1795), par *kilogramme*. L'Institut dont il est question plus haut deviendra l'Institut de France, actuellement connu par ses Académies.

Pour mettre en pratique la décision de diffusion des unités nouvelles du 1^{er} août 1793, il convenait d'établir la longueur du mètre fondée sur une fraction du méridien en cours de réalisation. Décision est prise de fixer la longueur d'un *mètre provisoire* déterminée par la mesure de la Méridienne de France qui, en 1740, avait été effectuée par Lacaille (Fig. 3). Rapportée à la toise de l'Académie/toise du Pérou, la longueur du mètre s'établissait à 3 pieds 11,44 lignes, prise à 13 degrés de l'échelle de température de René-Antoine Ferchault de Réaumur en usage à l'époque. Ce sont donc des barres métalliques de cette longueur qui se trouvèrent diffusées dans le pays en 1795/1796. Tel est le mètre installé sous les arcades de la rue de Vaugirard, presque en face de l'entrée du Sénat, au 15 de cette rue.

Dans le même temps, les mesures sur le terrain se poursuivaient, en utilisant une autre réalisation, fondée elle aussi sur une idée de Borda, celle de règles bimétalliques (platine et cuivre) de douze pieds de longueur, de six lignes en largeur et de presque une ligne pour son épaisseur. Elles étaient au nombre de quatre, numérotées I, II, III, IIII, de manière à pouvoir les reporter sur la longueur des bases de la triangulation, dans les mêmes successions, après leur étude par Borda et Lavoisier. Ces règles, appelées règles de Borda, sont conservées à l'Observatoire de Paris, deux par deux, dans des caisses en bois de

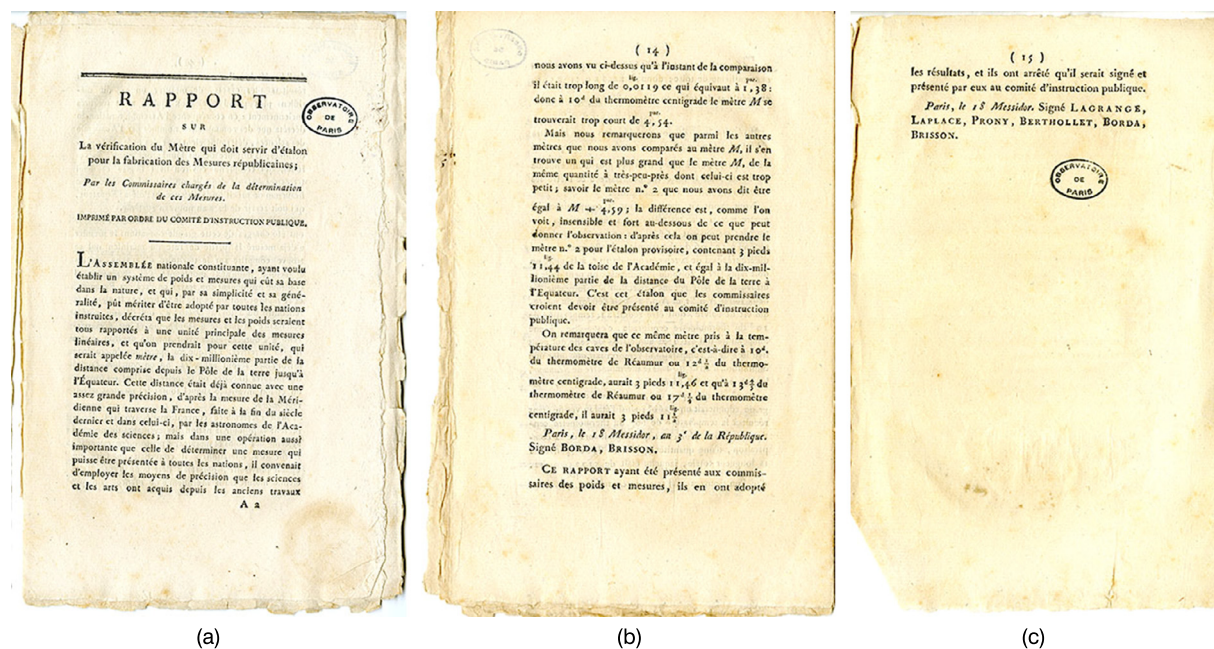


Fig. 3. Plaquette de quinze pages (3 pages, a, b et c). «Rapport sur la Vérification du Mètre qui doit servir d'étalon pour la fabrication de Mesures républicaines; Par les Commissaires chargés de la détermination de ces Mesures». Imprimé par ordre du Comité d'instruction publique. Le document n'oublie pas de mentionner les mesures effectuées par les prédécesseurs qu'ont été, Picard, La Hire, les Cassini I et II, non plus que les travaux de Lacaille et Cassini III. Ce sont d'ailleurs ces dernières mesures qui, en page 14, ont conduit à ce qui a été choisi comme valeur en pieds (3 pieds 11,44 lignes de la toise de l'Académie) pour l'étalon provisoire. La page 15 donne les noms de ceux qui ont signé le rapport. © Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

plus de quatre mètres de longueur, munies de poignées pour leur transport sur le terrain. Leur température était contrôlée par les barres elles-mêmes, constituant alors des thermomètres, la règle numéro 1 ayant le statut de *module* de comparaison avec les toises disponibles.

Pour les poids, l'étalon du kilogramme, devant correspondre à la masse d'un décimètre cube d'eau, a été obtenu à partir du volume d'un cylindre droit fabriqué par Fortin et très minutieusement contrôlé – pour ses dimensions extérieures – au comparateur, également de Fortin : les lignes et cercles que l'on y voit témoignent du soin pris pour ce faire; l'un et l'autre sont conservés à l'Observatoire de Paris. Un petit tube, fixé à la partie supérieure, assurait l'homogénéité de l'atmosphère avec celle de l'air contenu dans le cylindre; il permettait, en outre, de le suspendre à la balance de précision avec laquelle sa masse faisait l'objet de mesures dans l'air et dans l'eau. La masse du volume d'eau, correspondant au volume extérieur du cylindre, échouait à Lavoisier et Haüy, mesures achevées par Lefèvre-Gineau, après l'exécution de Lavoisier.

Le 11 prairial an VII (3 mai 1799), Trallès, représentant de la République helvétique, présente un «Rapport sur l'unité de poids du système métrique décimal, d'après le travail de M. Lefèvre-Gineau». Nombre de contrôles furent effectués jusqu'à obtenir 18 827,15 grains de la *pile de Charlemagne* pour le décimètre cube d'eau.

Les mesures sur le terrain continuaient à avancer (Figs. 4 et 5); cependant, Méchain rencontrait quelques difficultés dans la région de Barcelone et ne rentrait pas à Paris où Delambre était arrivé, ainsi que des représentants de différentes contrées européennes, selon le découpage du moment. Delambre, qui avait dû interrompre sa triangulation, avait pu la reprendre le 10 messidor an III (28 juin 1795); Méchain ne termine sa triangulation qu'en septembre 1798; ne rentrant pas aussitôt à Paris, il demeure à Carcassonne, où Delambre le rejoint. En novembre, les deux hommes retrouvent les savants arrivés à Paris en septembre.

L'ensemble, plus une commission française de 10 membres, se forme en trois commissions de caractère international : six républiques (batave, cisalpine, helvétique, ligurienne, romaine, toscane); trois royaumes (Danemark, Espagne, Sardaigne/Piémont). La commission I est chargée de comparer aux toises les règles employées dans la mesure des bases; la commission II s'emploie au quart du méridien et à la longueur du mètre; la commission III est responsable de la détermination de l'unité de poids. Une séance publique de l'Institut se tient le 15 messidor an VII (3 juillet 1799); le rapport général, tiré des rapports de chaque commission, est lu par Jan Hendrik Van Swinden (de la République batave), celui qui s'exprime le mieux en français, sous la forme d'un «Précis des opérations qui ont servi à déterminer les bases du nouveau Système Métrique».

Les spécialistes souhaitaient que le *mètre définitif* soit réalisé à un millième de ligne (Fig. 6). Delambre indique que douze mètres à bouts en fer et deux en platine furent fabriqués et comparés quatre par quatre à l'ensemble de deux toises. En conséquence de ces comparaisons, celui portant le numéro 2 a été sélectionné pour être ensuite comparé aux autres. Sur ce mètre, peut-être celui des collections de l'Observatoire de Paris, a été vérifié le mètre définitif en platine, qui a été déposé aux Archives nationales le 4 messidor an VII (22 juin 1799). Le second mètre en platine serait celui de l'Observatoire de Paris. Delambre n'a pas donné de détails sur le kilogramme à déposer aux Archives.

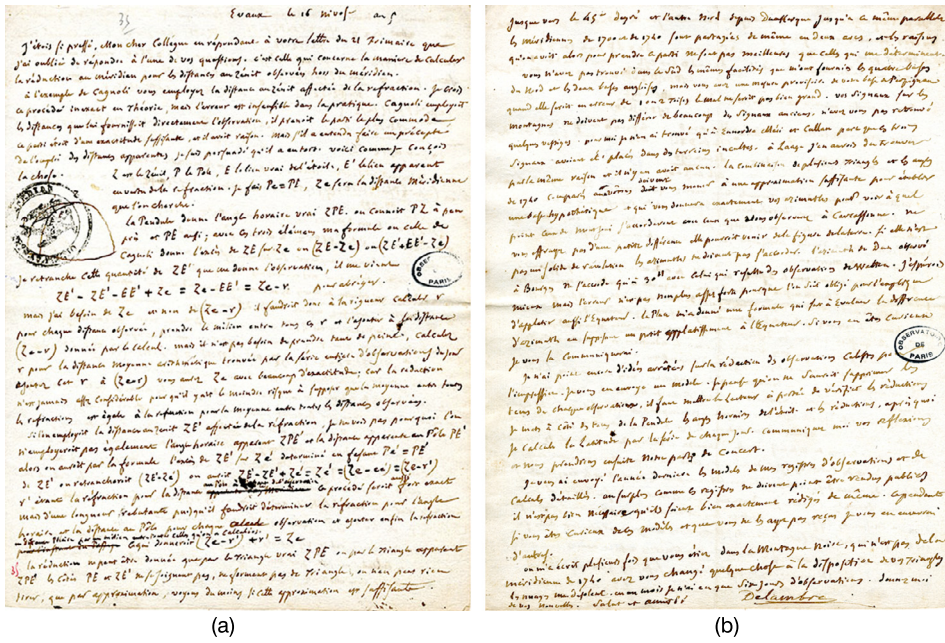


Fig. 4. Lettre de Delambre à Méchain envoyée d'Évaux et datée du 16 nivose an 5. Cette lettre du 5 janvier 1797 a été envoyée d'Évaux-les-Bains, une petite ville d'eau du Centre de la France, située à environ 25 kilomètres de Montluçon dans l'Allier. Delambre va y demeurer près de six mois, rencontrant des difficultés avec la valeur de la latitude qu'il trouve en ce bourg. Dans la dernière partie de cette longue lettre, Delambre évoque aussi la méridienne de 1740, mentionne Laplace et écrit à Méchain : « Ne vous effrayez pas d'une petite différence; elle pourrait venir de la figure de la Terre. » © Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

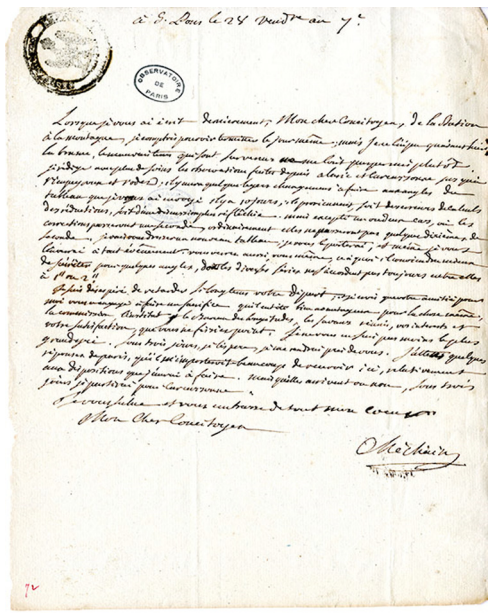


Fig. 5. Lettre de Méchain à Delambre du 28 vendémiaire an VII (2 pages, a et b). Dans cette lettre, datée du 19 octobre 1798, Méchain mentionne la Commission, l'Institut, le Bureau des longitudes, les savants réunis... , lesquels – à Paris avec Delambre – attendent sa venue; il est alors encore dans le Sud de la France, à Saint-Paul-de-Thomières. © Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

Le même jour, une délégation de l'Institut s'était rendue successivement au Conseil des Anciens et au Conseil des Cinq-Cents, les deux organes législatifs du Directoire, devant lesquels un orateur (peut-être Laplace) présenta un très long discours dans lequel il mettait en valeur les assemblées ayant concouru à la réaliser, sous l'égide de l'Académie des sciences, évoquant également Delambre, Méchain, Lefèvre-Gineau, l'Institut national, le gouvernement, les représentants des différents pays ayant participé à la finalisation des tâches, sans oublier ceux qui, décédés depuis le début des opérations, y avaient participé.

la commission alors créée, présenté par un de ses membres, Louis Mathieu, beau-frère de François Arago et astronome à l'Observatoire de Paris, membre de l'Académie des sciences et du Bureau des longitudes, y a été lu le 10 mai suivant, puis discuté le 20 mai. Après d'autres rapports et discussions, la loi du 4 juillet 1837 fut promulguée. Son article 1^{er} précise que « le décret du 12 février 1812, concernant les poids et mesures est et demeure abrogé ». L'article 3 fixe la date d'application : « à partir du 1^{er} janvier 1840, tous poids et mesures autres que les poids et mesures établis par les lois des 18 germinal an III et 19 frimaire an VIII, constitutives du système métrique décimal, seront interdits sous les peines portées par l'article 479 du Code pénal. » D'autres décrets concernent principalement les contrôles qui seront faits, le montant des amendes, etc.

Cependant, dès le 25 mars 1840, le Bureau des longitudes se trouvait saisi par Jean-Baptiste Biot relativement au prolongement de la méridienne en Espagne, mettant en cause la longueur du mètre de 1799. Une commission comprenant Pierre Daussy, Charles-Louis Largeteau et Louis Mathieu, tous également membres de l'Académie des sciences, en est chargée. À la séance du 2 juin 1841, « Mr Largeteau lit un rapport sur les calculs de l'arc du méridien compris entre Matas et Formentera qui viennent d'être faits [...] On décide qu'il sera apporté quelques modifications de rédaction à la partie de ce travail qui concerne le mètre. Après ces changements, le rapport sera soumis de nouveau à l'approbation du Bureau [...] »

Approuvé par le Bureau des longitudes, le rapport est transmis à l'Académie des sciences, où il est examiné le 21 juin 1841 ; il figure dans les pièces jointes aux minutes de cette séance, au titre de la géodésie, sous l'intitulé « Rapport fait au Bureau des Longitudes sur la détermination de la longueur de l'arc du méridien, compris entre les parallèles de Dunkerque et de Formentera », dont le rapporteur est Largeteau, au volume 12 des *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, repris des procès-verbaux du Bureau des longitudes [5].

Ce rapport s'achève sur la décision prise : « La longueur du mètre a été fixée d'une manière définitive par la Commission des poids et mesures ; cette longueur ne pourra ni ne devra jamais être changée. » Ceci explique que les réalisations successives du mètre demeurent dans la limite des erreurs affectant celles qui les ont précédées, de sorte à être conforme à la longueur de 1799.

2. La Convention du mètre de 1875, base formelle des accords internationaux qui ont rendu international le système métrique (TJQ)

2.1. Les besoins de la géodésie

Stimulés par la France qui, lors de l'Exposition universelle de 1851 à Londres, avait exposé un ensemble d'unités de mesure établies par le Conservatoire des arts et métiers, de nombreux pays commencèrent à utiliser les éléments du système métrique en usage dans ce pays. Ces unités de mesure n'étaient pas étalonnées directement à partir du mètre et du kilogramme des Archives, mais à partir de copies détenues par le Conservatoire. Celles-ci avaient été établies en même temps que les unités des Archives et déposées, non seulement au Conservatoire, mais encore à l'Observatoire de Paris et à l'Académie des sciences. En 1848, le Conservatoire, en tant que prestataire du Service officiel des poids et mesures pour la France, avait également assumé le rôle d'intermédiaire en ce qui concernait le lien entre les unités étrangères et le système officiel français. Si satisfaisant qu'il ait été cet arrangement dans son ensemble, il ne l'était pas en ce qui concernait la géodésie, pour laquelle l'ancienne unité de mesure française, la toise, continuait d'être utilisée.

Au milieu du XIX^e siècle, la géodésie pratique comptait deux grandes figures, Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) et Johan Jacob Baeyer (1794–1885). Bessel était astronome et directeur de l'Observatoire de Königsberg, où il conservait une copie de la toise utilisée comme référence pour une grande partie de la géodésie de la région. Johan Jacob Baeyer était un officier de l'armée prussienne et avait commencé ses études de géodésie en tant que commandant de l'État-Major général de l'armée détaché pour travailler avec Bessel. En 1861, il proposa au ministre prussien de la guerre l'établissement d'une mesure des arcs d'Europe centrale. En 1864 et 1867, deux conférences se tinrent à Berlin. Les principales réalisations de ces conférences furent la décision de l'organisation d'une collaboration des pays d'Europe centrale dans le domaine de la géodésie et l'établissement d'une liste de recommandations scientifiques pour la géodésie future en Europe.

Les recommandations adoptées lors de la deuxième conférence [6] inaugurèrent la suite de décisions officielles devant conduire à la signature de la Convention du mètre en 1875 à Paris, et ainsi à la naissance de la métrologie moderne. Ces recommandations furent établies par un comité présidé par Otto Struve (1819–1905) directeur de l'observatoire de Pulkovo à Saint-Petersbourg, Wilhelm Foerster (1832–1921), directeur de l'Observatoire de Berlin, et Adolph Hirsch (1830–1901), directeur de l'Observatoire de Neuchâtel. Foerster et Hirsch devinrent ensuite les architectes de la Convention du mètre. Foerster présida le Comité international des poids et mesures de 1891 à 1920 et Hirsch en fut le secrétaire de 1875 à 1901.

Parmi les recommandations adoptées en 1867 figuraient celles qui suivent : afin de définir l'unité commune de mesure pour tous les pays de l'Europe et pour tous les temps aussi exactement et aussi invariablement que possible, la conférence recommande la construction d'un nouveau mètre prototype européen ; la longueur de ce mètre européen devrait différer aussi peu que possible de celle du mètre des Archives de Paris et sa construction et sa comparaison avec les copies destinées aux différents pays devraient être confiées à une commission internationale, dans laquelle les pays intéressés seraient représentés.

Aussi, la conférence se prononce pour la création d'un Bureau européen international de poids et mesures et charge les délégués de porter ces recommandations à l'attention de leurs gouvernements.

2.2. La Commission internationale du mètre

En France, les recommandations de la conférence de Berlin provoquèrent une vive inquiétude dans la mesure où, indépendamment de toute autre considération, rien ne permettait d'affirmer que le Bureau européen des poids et mesures envisagé aurait son siège en France. Les réactions des trois principaux organismes scientifiques français de l'époque – le Bureau des longitudes, le Conservatoire impérial des arts et métiers et l'Académie des sciences – aux recommandations de la conférence de Berlin ne se firent pas attendre.

Le premier à réagir fut le Bureau des longitudes. L'intérêt de celui-ci pour l'éventuelle création d'un laboratoire prenait sa source dans l'une de ses missions premières, à savoir la prise en charge des instruments de l'Observatoire de Paris. Il ne faisait aucun doute que les membres du Bureau avaient compris les recommandations de 1867 comme devant conduire à la création d'un institut ou d'un laboratoire scientifique. Le Bureau des longitudes appela aussitôt l'attention du gouvernement français sur ces importantes résolutions, lui adressant en décembre 1867 un rapport où l'on pouvait lire [7] :

« Il nous serait difficile de ne pas voir dans cette espèce de manifeste l'expression très accentuée d'un besoin scientifique auquel la France, à ce qu'on paraît croire, n'offrirait pas actuellement pleine satisfaction [...] Selon nous, il conviendrait de compléter ces mesures par la création, à Paris, d'un établissement spécial et permanent pour l'étude rigoureuse des étalons métriques et des règles géodésiques. Les travaux de tous genres relatifs à la propagation du système métrique au dehors pourraient être confiés à ce laboratoire sous la direction du Bureau des longitudes et avec la coopération de commissaires spéciaux délégués par le gouvernement français et par les gouvernements intéressés. »

Deux ans plus tard, en 1869, consécutivement à un rapport nettement plus fourni émanant de l'Académie des sciences [8], le gouvernement français invita tous les États avec lesquels la France avait des relations diplomatiques à envoyer des délégués officiels en vue de leur participation à une Commission internationale du mètre, qui devait planifier la construction d'un nouveau prototype du mètre, conçu à partir de celui des Archives, mais qui serait un étalon à traits plutôt qu'un étalon à bouts. Il fut proposé de confier le travail de fabrication du nouvel étalon et de ses copies destinées aux États participants à une section française permanente de la nouvelle commission, avec toutefois l'aide et les conseils de ses membres internationaux. Nulle mention n'était faite de la proposition de créer un bureau européen international des poids et mesures, aucune mention non plus du kilogramme. Les détails furent, pour une grande part, établis par le Conservatoire impérial des arts et métiers en la personne d'Arthur Morin (1795–1880), son président, et celle de son assistant Henri-Edouard Tresca (1814–1885), tous deux devant jouer ensuite un rôle majeur dans le travail de la section française de la Commission. Ce fut Tresca qui conçut la coupe transversale en X du nouveau prototype du mètre de façon à ce que les deux lignes définissant sa longueur et situées sur le plan neutre du centre n'aient à subir qu'une altération mineure en cas de courbure de la barre de l'étalon.

Des membres de la section française furent rapidement nommés : Claude-Louis Mathieu (1783–1875), membre de l'Académie des sciences, président ; Arthur Morin, membre de l'Académie des sciences, directeur du Conservatoire impérial des arts et métiers ; Le Verrier (1811–1877), membre de l'Académie des sciences, directeur de l'Observatoire de Paris ; Ernest Laugier (1812–1872), membre de l'Académie des sciences et du Bureau des longitudes ; Hervé Faye (1814–1902), membre de l'Académie des sciences et du Bureau des longitudes ; Hippolyte Fizeau (1819–1896), membre de l'Académie des sciences ; Henri Sainte-Claire Deville (1818–1881), membre de l'Académie des sciences ; le général Jarras (1811–1890), directeur du Dépôt de la Guerre ; Édouard Becquerel (1820–1891), membre de l'Académie des sciences ; Eugène Peligot (1811–1890) membre de l'Académie des sciences, et Tresca, directeur adjoint du Conservatoire impérial des arts et métiers. Ce comité prestigieux se réunit pour la première fois en novembre 1869 et se mit aussitôt à l'œuvre pour entreprendre la conception et la fabrication des futurs nouveaux prototypes métriques du mètre et du kilogramme. On notera qu'ils étaient tous nés avant 1820 !

Pendant ce temps, vingt-quatre gouvernements avaient répondu à l'invitation concernant l'envoi de délégués devant participer à la Commission du mètre. La première réunion fut fixée au 8 août 1870, date à laquelle fut créé un comité des recherches préparatoires. Il n'y eut guère d'autre action, car en août 1870 la France était en pleine guerre avec la Prusse et de nombreux délégués ne purent être présents. Toutefois, le comité pour la recherche préparatoire comprenait des membres de la section française et un certain nombre de délégués étrangers, notamment Foerster et Hirsch. Les délégués nommés pour la Commission étaient presque tous des scientifiques éminents, qui exerçaient de hautes fonctions dans leurs pays et étaient, pour la plupart d'entre eux, membres de leur Académie des sciences nationale et directeurs d'instituts des poids et mesures lorsque ceux-ci existaient.

2.3. Le projet de Convention du mètre proposé en 1872

Le comité des recherches préparatoires se réunit pour la première et unique fois en avril 1872 et, dans son rapport [9], se découvrent les grandes lignes de ce qui devait devenir la Convention du mètre.

- 1) La Commission internationale du mètre est déclarée l'organe scientifique central pour tous les intérêts métrologiques des pays qui adoptent le système métrique ; formée par les délégués des gouvernements de ces pays, elle s'assemblera périodiquement pour délibérer sur toutes les questions importantes des poids et mesures qui, par leur nature, exigent une solution internationale. [Lors de la Convention du mètre, celle-ci devint la Conférence générale des poids et mesures, CGPM.]

- 2) La Commission nomme dans son sein un comité permanent de cinq membres, appartenant tous à des pays différents, chargé de veiller à l'exécution de ses décisions. [Ceci devint le Comité international des poids et mesures, CIPM].
- 3) Comme organe exécutif de la Commission, et sous la surveillance de son comité permanent, il sera fondé à Paris un Institut métrologique international, auprès duquel seront déposés les prototypes internationaux, ainsi que tous les appareils et instruments nécessaires à leur conservation et à leur comparaison. [Ceci devint le Bureau international des poids et mesures, BIPM.]

La Commission internationale elle-même tint une seule et unique réunion plénière en septembre 1872, durant laquelle elle valida les propositions générales du comité des recherches préparatoires et créa un comité permanent de douze membres chargé de la supervision de la construction effective des nouveaux prototypes métriques [10]. La Commission internationale du mètre établit plusieurs sous-commissions où furent répartis ses membres. À la suite d'une discussion approfondie concernant tous les aspects du choix, de la conception et de la construction des nouveaux prototypes métriques, la Commission fit une série de recommandations dans lesquelles on retrouve l'essentiel de ce qui devait devenir la Convention du mètre – reprenant presque dans son intégralité les propositions du comité des recherches préparatoires. Concernant la création d'un bureau international, nous pouvons lire : « La Commission internationale informe les gouvernements de l'utilité de la création à Paris d'un *Institut international des poids et mesures* (avec, dans le texte original, le I majuscule et les caractères en italique pour le mot *Institut* . . .) [11]. Cet établissement sera international et déclaré neutre, son siège se situera à Paris, il sera subventionné par les contributions de tous les gouvernements signataires du traité fondateur de l'Institut. »

2.4. La Conférence diplomatique du mètre de 1875 – la déclaration décisive de Dumas

La Conférence diplomatique qui établit la Convention se tint à Paris du 1^{er} mars au 20 mai 1875, date à laquelle la Convention du mètre fut signée par les représentants de dix-sept États. Les délégués plénipotentiaires des vingt États qui avaient envoyé des délégués à la Commission internationale du mètre étaient présents, accompagnés de délégués scientifiques qui avaient également pris part aux discussions antérieures [12].

La session plénière d'ouverture des délégués plénipotentiaires fut suivie d'une série de réunions des délégués scientifiques destinées à aboutir à un accord sur la proposition finale à soumettre à la conférence. Les discussions qui eurent lieu au cours des réunions des délégués scientifiques furent parfois tendues, en conséquence de différences d'opinion entre les pays en ce qui concernait le soutien à apporter à la science et le rôle futur d'un institut scientifique international. Aucun accord ne put être trouvé et la décision finale revint à la conférence des délégués plénipotentiaires. Tous convinrent dès le départ de la nécessité de créer un institut scientifique ayant pour mission de travailler à l'établissement et à la diffusion des nouveaux étalons du mètre et du kilogramme, comme il avait été proposé par la Commission du mètre. Trois délégations, cependant, celles de la Grande-Bretagne, des Pays-Bas et du Portugal, étaient fortement opposées, chacune pour des raisons différentes, à ce qu'il eût un caractère permanent. Au début, plusieurs autres délégations s'abstinrent de se prononcer, dans l'attente de l'évolution des débats.

Le gouvernement britannique avait, dès l'abord, annoncé qu'il était opposé à tout institut, *office* scientifique permanent aux motifs (a) que les coûts, si peu élevés fussent-ils au départ, ne manqueraient pas d'augmenter plus tard, (b) qu'un *office* international de ce type créerait ce qui pourrait s'avérer plus tard un précédent fâcheux, et (c) que de toute façon la Grande-Bretagne n'avait aucun intérêt à l'adoption du système métrique [13].

Pour les Pays-Bas, le délégué estimait qu'un institut scientifique permanent porterait tort à la science, dans la mesure où, d'une part, il aurait trop de pouvoir et où, de l'autre, le personnel y serait inévitablement peu qualifié car, une fois les nouveaux étalons définitivement établis, il ne resterait plus guère de choses intéressantes à faire. Pour le Portugal, le délégué était Arthur Morin qui, n'étant pas inclus dans la délégation française, s'était arrangé pour être le représentant du Portugal ; il est clair qu'il souhaitait voir confier ce travail à son propre institut, le Conservatoire à Paris.

Face à ces fortes objections de la part de trois délégations à l'idée d'un institut permanent, deux propositions furent soumises lors de la réunion des délégués scientifiques. La première, soumise par Foerster, immédiatement soutenue par une majorité de délégués, prônait la création d'un institut scientifique international permanent, tandis que la seconde proposait celle d'un institut qui, une fois effectué le travail d'établissement des nouveaux étalons, en deviendrait le simple dépositaire. Le titre de la première proposition était : « Projet d'une organisation internationale pour un travail métrologique concernant la fabrication et la vérification des nouveaux prototypes métriques, l'entrepôt de ces prototypes et leur usage ultérieur ». Elle comprenait deux articles sur l'institut international envisagé, le premier étant :

« Pour mener à bien la tâche décidée par la Commission, un Institut international des poids et mesures serait fondé sur les bases suivantes : l'établissement serait international et déclaré neutre, son siège serait à Paris, sa création et sa maintenance seraient supportées par des fonds provenant de tous les pays adhérant au traité conclu pour le créer et l'institut serait placé sous la direction et le contrôle de la Commission internationale des poids et mesures. »

L'article suivant dressait la liste de ses tâches scientifiques. Celles-ci figurent presque intégralement dans le texte final de la Convention, où elles apparaissent dans son article 6 (1875). Ainsi, le statut et les missions du bureau international envisagé étaient établis dès l'origine et ne furent pas modifiés ultérieurement au cours de la conférence.

La seconde proposition visait seulement à faire d'un certain bâtiment existant de Paris le siège de l'institut international où s'effectuerait le travail de fabrication des nouveaux étalons, à la suite duquel il deviendrait un entrepôt des étalons à la disposition, quand cela s'avérerait nécessaire, de scientifiques envoyés par les États participants. Elle comprenait un article

donnant aux États souhaitant en faire un institut scientifique permanent la possibilité de faire tout arrangement à leur convenance. Diverses tentatives furent faites en vue de parvenir à un compromis, mais sans succès, la France, à ce stade, s'abstenant de prendre parti.

Ce fut ainsi que les délégués à la conférence des plénipotentiaires furent chargés de décider laquelle des deux propositions adopter. Après les interventions de délégations très représentatives des opinions de leurs délégués scientifiques, le délégué pour la France, Jean-Baptiste Dumas (1800–1884), déclara que la France était fortement en faveur de la première proposition. Sa déclaration décisive fut la suivante [14] :

« Le système métrique étant, par le principe qui a présidé à sa création, un système essentiellement scientifique, auquel il convient d'assurer, dans l'intérêt général des peuples qui l'ont adopté et dans l'intérêt de la science qui l'emploie, tous les perfectionnements dont il est susceptible, le gouvernement français admet que l'établissement dont on propose la fondation de part et d'autre ait lui-même un caractère scientifique d'ordre supérieur ; qu'il soit permanent, pour rendre possibles, non seulement l'achèvement du travail en cours d'exécution, dans les conditions déjà déterminées, mais encore tous les travaux que la propagation du système métrique et les progrès incessants de la science métrologique pourront réclamer. Il admet également que, pour répondre à son véritable objet, cet établissement soit international et neutre.

« De ces principes, auxquels le gouvernement français donne son adhésion, on peut déduire par une conséquence logique la création d'un bureau chargé de la conservation des prototypes internationaux et de leurs témoins, de leurs vérifications ultérieures, de la construction à venir des étalons qui seraient demandés par des États non encore pourvus ou par des établissements scientifiques, de la comparaison des échelles des instruments de précision qui seraient soumis à ses vérifications, et, en général, de tous les travaux intéressant les progrès de la métrologie. »

Cette déclaration convainquit la plupart des quelques délégations qui réservaient encore leur choix et la proposition visant à créer un institut scientifique permanent fut finalement adoptée, avec les seuls Pays-Bas se prononçant pour la seconde proposition, la Grande-Bretagne et le Portugal ayant choisi l'abstention. Une tentative de dernière minute pour reporter la décision finale fut contrée par le plénipotentiaire allemand, qui déclara fermement que son gouvernement acceptait l'invitation de son homologue français dans l'idée que l'objectif principal de la conférence était la création d'un établissement scientifique neutre et permanent, comme très exactement stipulé dans le projet n° 1, et que c'était pour celui-ci qu'il l'autorisait à apposer sa signature.

Quelques jours plus tard, le 15 avril 1875, lors de l'avant-dernière session de la Conférence diplomatique du mètre, deux décisions importantes furent prises : celle de nommer les premiers membres du futur Comité international des poids et mesures et celle de faire précéder les articles de la Convention par un préambule qui en indiquerait les objectifs. Le premier Comité international des poids et mesures devait être constitué par les membres existants du comité permanent de la Commission du mètre élus en 1872, auxquels devaient s'ajouter deux autres membres, pour atteindre un total de quatorze. Ils furent habilités à commencer à travailler sur la création du futur Bureau international, sans précision quant aux engagements financiers.

Le préambule à la Convention fut rédigé par le représentant du ministère des Affaires étrangères français, introduisant directement les articles de la Convention et formulé ainsi [15] :

Leurs Majestés... etc. etc. [*liste des noms des chefs d'État*],

Désirant assurer l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique, ont résolu de conclure une Convention à cet effet et ont nommé, pour leurs plénipotentiaires :

[*liste des noms des plénipotentiaires*],

Lesquels, après s'être communiqué leurs pleins pouvoirs, trouvés en bonne et due forme, ont arrêté les dispositions suivantes :

Article premier

Les Hautes Parties contractants s'engagent à fonder et entretenir à frais commun, un *Bureau international des poids et mesures*², scientifique et permanent, dont le siège est à Paris.

Article 2

Le gouvernement français prendra les dispositions nécessaires pour faciliter l'acquisition ou, s'il y a lieu, la construction d'un bâtiment spécialement affecté à cette destination dans les conditions déterminée par le règlement annexé à la présente Convention.

Article 3

Le Bureau international fonctionnera sous la direction et la surveillance exclusives d'un *Comité international des poids et mesures*, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence générale des poids et mesures*, composée des délégués de tous les gouvernements contractants.

Venaient ensuite les 13 autres articles de la Convention et les 22 articles des « Règlements » qui, suivant l'article 22, ont la même force que ceux de la Convention. Il y avait, en outre, une annexe supplémentaire de 6 articles définissant les

² En italique ici et ailleurs dans le texte original de 1875.

arrangements transitoires pour les États ayant participé à la Commission internationale du mètre mais n'ayant pas signé la Convention, ainsi que les tâches dévolues à la section française de la Commission et les coûts de fabrication des nouveaux prototypes.

Le 20 mai 1875, la Convention ainsi définie fut officiellement adoptée par les plénipotentiaires de dix-sept des vingt pays représentés à la conférence et entra en vigueur le 1^{er} janvier 1876.

C'est ainsi que fut créé par la Convention de 1875 le premier institut scientifique international, le Bureau international des poids et mesures. Le site choisi pour son installation fut rapidement trouvé : l'ancien pavillon de Breteuil du parc de Saint-Cloud. Il avait été très fortement endommagé lors de la guerre de 1870, mais il fut dûment réparé et un laboratoire construit sur son terrain.

2.5. La section française et les nouveaux étalons métriques du mètre et du kilogramme

Entre-temps, la section française de la Commission du mètre avait avancé le travail avec une remarquable énergie [16]. En 1874, une première fonte de quelque 250 kg de platine et 10% d'iridium pour les nouveaux étalons avait été réalisée par Saint Clare Deville et son ami anglais George Matthey (1826–1913). La fonte avait été effectuée dans un laboratoire spécialement conçu à cet effet au Conservatoire national des arts et métiers. Malheureusement, il s'avéra qu'une légère contamination par du fer était intervenue. L'alliage utilisé pour la plupart des nouveaux mètres et kilogrammes fut fondu par George Matthey à Londres quelques années après la signature de la Convention du mètre, et bien évidemment financé par les États membres de la nouvelle organisation intergouvernementale ainsi créée.

Un total de quarante barres métriques et le même nombre de kilogrammes en alliage platine–10% d'iridium durent être commandés pour répondre aux demandes des États membres. La section française entreprit la tâche immense consistant, tout d'abord à fabriquer les nouveaux mètres, puis à les comparer entre eux avant d'apprendre à comparer ces nouveaux étalons à traits avec l'étalon à bouts du mètre des Archives. Pour ce faire, un appareil mécanique/optique inventé à cette fin par Fizeau fut utilisé. Les nouveaux kilogrammes étaient comparés avec celui des Archives. Il avait été entendu que les nouveaux prototypes métriques seraient le mètre et le kilogramme qui s'approcheraient le plus, parmi les nouveaux créés, de la longueur et du poids de ceux des Archives (Fig. 7).

2.6. Le Bureau international des poids et mesures à Sèvres

Parallèlement au travail effectué par la section française sur les nouveaux étalons, le Comité international se chargea de concevoir les plans d'un bâtiment pour un laboratoire, d'en superviser la construction, achevée en 1878, et de passer commande pour les divers comparateurs et balances, tout en entamant une collaboration avec la section française de la Commission du mètre. Le travail fut achevé vers la fin des années 1880 et la première Conférence générale des poids et mesures (CGPM) se tint en 1889. Les nouveaux prototypes métriques furent officiellement adoptés et déposés au Bureau international, tandis chacun des dix-sept États présents en recevait un exemplaire.

Ceci n'était, néanmoins, que le début de la métrologie moderne. Deux ans après la première CGPM, dans les procès-verbaux de la réunion de 1891 du Comité international, on peut lire la déclaration suivante [17] :

« Dès l'origine du Comité international, il a été généralement reconnu qu'il serait d'une importance fondamentale de déterminer les relations entre les unités métriques et quelques constantes physiques de base qu'on peut déduire de certains phénomènes naturels. »

Le résultat fut qu'Albert Abraham Michelson (1852–1931) fut invité à se rendre au BIPM avec son interféromètre optique pour mesurer le nombre de longueurs d'ondes de la lumière du cadmium. Le résultat obtenu par Michelson et René Benoît (1844–1922) en 1892 fut que le mètre est égal à 1 553 163,8 fois la longueur d'onde de la ligne d'émission rouge du cadmium.

Un résultat supérieur fut obtenu quelques années plus tard, en 1906, par le directeur du BIPM, René Benoît, avec Charles Fabry (1867–1945) et Alfred Pérot (1863–1925), qui aboutirent au chiffre 1 553 164,13, avec un degré d'incertitude estimé à quelques dixièmes de micromètre. Ce qui équivaut à dire que la longueur d'onde de cette lumière est 0,64384696 micromètres. La même valeur fut adoptée lors de la 7^e conférence générale de 1927 [18] pour définir l'angström, soit :

$$\lambda_{\text{cd}} = 6438,4696 \text{ \AA}$$

Finalement, en 1960, quand le mètre fut redéfini par la 11^e CGPM [20] en termes de la longueur d'onde de la raie spectrale orange du krypton 86, la valeur finale fut choisie pour concorder avec la valeur de 1927 de l'angström et ainsi concorder avec le résultat obtenu par Benoît et Fabry en 1906. Ce résultat était lui-même très proche de celui obtenu par Michelson en 1892. Pourquoi attendirent-ils près de soixante-dix ans, en 1960, avant d'effectuer ce changement important, qui s'annonçait dès 1892 ?

Il y avait deux raisons. La première était que la précision de la métrologie mécanique à la fin du XIX^e siècle était déjà si haute qu'il n'y avait véritablement aucun besoin pressant de pousser la recherche plus avant du point de vue pratique. La seconde était qu'en effectuant les mesures qui conduisirent au résultat de 1906, Benoît, Fabry et Pérot avaient remarqué que les lignes spectrales observées n'étaient pas aussi nettes que prévu, sans pouvoir en expliquer la cause. Il fallut attendre la découverte des isotopes une dizaine d'années plus tard pour que celle-ci apparaisse, et encore plus longtemps avant que ne deviennent disponibles des échantillons d'isotopes d'éléments appropriés.



Fig. 7. Dépôt de prototypes métriques au Bureau international des poids et mesures ; en haut, le mètre international de 1889 dans son étui métallique ; en bas, le kilogramme international, \mathcal{K} , sous ses trois cloches en verre, avec ses six témoins, numéros 7, 43, K1, 47, 8₄₁ et 32, dans le dépôt des prototypes métriques au BIPM où il fut déposé après son adoption par la première Conférence générale des poids et mesures, le jeudi 26 septembre 1889. Ce prototype restera l'unité officielle de masse jusqu'au 20 mai 2019, lorsque entrera en vigueur la nouvelle définition basée sur une valeur numérique fixe de la constante de Planck. Le témoin numéro K1 est un des trois cylindres de platine iridié, K1, KII et KIII, livrés par Johnson Matthey à Londres en 1878, qui furent ajustés et polis à Paris et comparés au kilogramme des Archives en 1880. Le cylindre KIII, dont la masse fut trouvée la plus proche de celle du kilogramme des Archives, fut choisi comme futur prototype international du kilogramme en 1883 et sanctionné comme tel en 1889. En 1884, quarante cylindres en platine iridié furent livrés par Johnson Matthey, et ensuite polis et ajustés au BIPM (à ± 1 mg près). Les numéros 1 à 40 leur furent attribués. Au cours de la conférence, trente-quatre étalons furent attribués par tirage au sort aux États membres de la Convention du mètre. Les numéros 9, et 31 furent attribués au BIPM comme prototypes d'usage ; les numéros K1, 7, 8₄₁ et 32 devinrent témoins. Le 8₄₁ indique qu'à un certain moment il y eut confusion pour savoir si cet étalon était le numéro 8 de l'alliage de 1884 ou le premier étalon d'une nouvelle livraison de Johnson Matthey. En 1938, deux autres étalons furent choisis comme témoins, les numéros 43 et 47 fabriqués à partir d'autres cylindres livrés ultérieurement par Johnson Matthey. Le nombre de témoins de \mathcal{K} fut ainsi porté à six. En 1997, le kilogramme international et ses témoins furent transférés dans un nouveau coffre moderne, à côté de l'ancien.

2.7. Étalonnages au Bureau international des poids et mesures

Parmi les arguments avancés lors de la Conférence diplomatique du mètre en faveur d'une institution scientifique permanente, figurait celui qu'il n'existait à l'époque aucune structure en mesure de fournir aux instituts et aux universités des calibrages fiables d'étalons devant permettre l'obtention de résultats scientifiques comparables à l'échelle mondiale. Pour cette raison, parmi les tâches du Bureau spécifiées lors de la Convention figurait : « De la comparaison des étalons et échelles de précision dont la vérification serait demandée, soit par les gouvernements, soit par des sociétés savantes, soit même par des artistes et des savants. » Dès 1878, le président du Comité international avait écrit aux gouvernements contractants pour leur annoncer l'ouverture d'un service d'étalonnage et de vérification pour les services de poids et mesures nationaux.

Le fait que les signataires de la Convention avaient tiré profit des compétences et de la réputation croissante du Bureau international est avéré par la diversité et l'extension géographique considérables des demandeurs d'étalonnages, pour toutes sortes d'utilisateurs. À la fin du siècle, jusqu'à une centaine d'étalonnages était réalisée chaque année. Ceci est sans nul doute l'origine du nom « Service international des poids et mesures », apparu pour la première fois en 1887 en rapport avec la nouvelle échelle thermométrique des thermomètres à hydrogène établie par le Bureau. Ce service fourni par le Bureau international était l'équivalent international des services nationaux gérés par ses homologues locaux [19].

2.8. La seconde Convention de 1921 et la lente progression vers des unités basées sur les phénomènes naturels

La Convention du mètre fut amendée par une seconde Convention en 1921 [21]. Cette seconde Convention fut signée par les plénipotentiaires des 27 États alors adhérant à la première Convention de 1875. Les modifications étaient significatives, dans la mesure où le champ des activités prévues par la Convention se trouvait élargi pour inclure, au-delà des étalons électriques initiaux, toute nouvelle initiative émanant des États membres (Fig. 8). S'ajoutèrent également divers amendements mineurs, d'ordre financier ou autre. Dans le texte qui apparaît sur le site web actuel du BIPM, les différents articles de la Convention sont chacun suivis d'une date, soit 1875, soit 1921, avec une seule petite modification datée de 1907. C'est celle qui fait autorité aujourd'hui comme fondement officiel de la métrologie internationale.

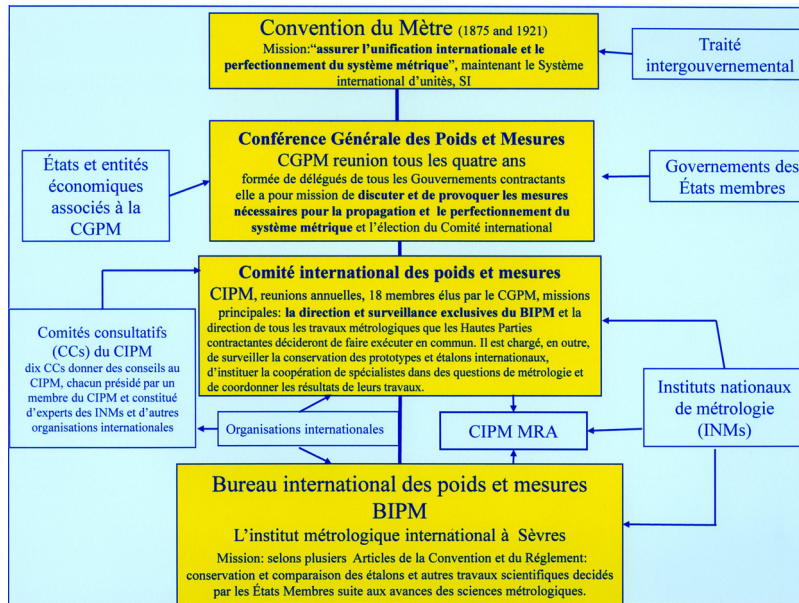


Fig. 8. Diagramme de l'organisation actuelle de la métrologie internationale basée sur la Convention du mètre de 1875, légèrement modifiée en 1921 par une seconde Convention. Depuis, la structure formelle est restée inchangée. Y sont indiqués les Comités consultatifs créés par le Comité international, le CIPM MRA (reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure) créé en 1999, les États associés à la CGPM créés pour que les États non signataires de la Convention du mètre puissent participer au MRA, et certaines liaisons avec d'autres institutions.

Peu de temps après la signature de la seconde Convention du mètre, le Comité international créa un comité consultatif pour l'électricité, composé d'experts issus des laboratoires nationaux d'étalons, désormais nombreux. Il fut rapidement suivi par un comité consultatif pour la température et la photométrie. Il existe actuellement dix comités consultatifs de ce type, qui offrent conseils et recommandations au Comité international dans tous les secteurs de la métrologie moderne, chimie et biologie bien entendu incluses. C'est dans ces comités consultatifs que les propositions pour la création ou la révision du Système international d'unités sont étudiées par les experts mondiaux de chaque discipline.

Les travaux pour la définition d'autres unités basées sur des phénomènes naturels furent lents et prirent de nombreuses années. Il existait déjà, bien sûr, l'unité de température, définie comme un centième de l'intervalle compris entre le point de congélation et le point d'ébullition de l'eau, devenu plus tard $1/273,16$ de la température absolue du point triple de l'eau. Mais ces définitions, quoique reposant sur des phénomènes naturels, restaient dépendantes des propriétés macroscopiques de la matière, donc susceptibles d'enregistrer des contaminations et toutes sortes d'effets perturbants.

La redéfinition suivante d'unité basée sur un phénomène naturel ou, comme il est dit actuellement, une constante de la physique, fut l'unité de temps, la seconde, qui, à la 13^e CGPM de 1967 [22], fut redéfinie 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 reste celle d'aujourd'hui, bien qu'existent actuellement des transitions de fréquences optiques d'environ deux ordres de grandeur plus stables, destinées à remplacer la fréquence du césium comme référence de temps.

En ce qui concerne les autres unités de base, qui ont toutes été redéfinies en référence à des constantes de la physique à la 26^e Conférence générale des poids et mesures en novembre 2018, il est intéressant de noter les remarques faites à la 14^e CGPM [23] par Jan de Boer, alors secrétaire du Comité international. Lors de son introduction à la nouvelle (à l'époque) définition de l'unité de quantité de matière, la mole, celui-ci a dit :

« Pour ce qui concerne l'unité de masse, le choix d'une définition atomique, par exemple la masse du proton ou bien l'unité de masse atomique unifiée, pourrait sembler plus naturel ; mais une telle proposition me semble encore loin de sa réalisation, parce qu'elle nécessite une détermination exacte de haute précision de la masse du proton. Dans ce cas, on voit clairement que ce sont les exigences de la métrologie qui sont prédominantes et qui nous obligent à maintenir un étalon macroscopique sous forme de prototype.

« Pour ce qui concerne l'unité de base pour la grandeur intensité de courant électrique, ici, de nouveau, on pourrait imaginer la charge électrique du proton comme l'unité de charge électrique la plus naturelle ou fondamentale pour servir de base à un système universel d'unités ; mais, dans ce cas aussi, ce sont les exigences de métrologie qui rendent une telle proposition impraticable pour mesurer avec une haute précision les grandeurs électriques.

« Naturellement, on peut se demander aussi dans ce cas s'il n'aurait pas été préférable de remplacer la définition de la mole donnée ici par une définition moléculaire ; mais, comme dans le cas de l'unité de masse ou l'unité de charge électrique, cela entraînerait des déterminations, telles qu'un comptage absolu de molécules ou bien la mesure de la masse des molécules, qui ne sont pas possibles avec une précision suffisante. »

Tout changea vingt ans plus tard avec la découverte par Klaus von Klitzing de l'effet Hall quantique. Celui-ci, avec l'effet Josephson découvert en 1962 par Brian Josephson, ouvrit la voie à l'utilisation de la balance de Kibble (du nom de Bryan Kibble, 1938–2016) pour mesurer la constante de Planck et ainsi aboutir à un lien direct avec la masse, ainsi qu'à une définition du courant électrique basée sur une valeur numérique déterminée de la charge élémentaire. Tout ceci est décrit dans divers articles du présent volume.

La Convention du mètre, inchangée depuis 1921, continue de fournir la base de l'accord international officiel sur les étalons de mesure. Elle a été complétée en 1999 par la signature d'un accord de reconnaissance mutuelle, établi sous les auspices du Comité international des poids et mesures pour garantir l'unification internationale (voir le préambule de la Convention du mètre) «des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie» [24]. Des procédures officielles de comparaison internationales furent établies pour démontrer et quantifier le niveau précis d'accord mondial sur les étalons de mesure parmi les instituts de métrologie nationaux. Cet accord est connu à travers ses initiales en anglais, CIPM MRA, et les résultats des nombreuses comparaisons internationales et des capacités induites de calibration et de mesure figurent sur le site web du BIPM. Cet accord n'est, en aucun cas, un nouveau traité ; il s'agit d'un agrément signé par les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie.

Avec la nouvelle définition du Système International adoptée par la 26^e Conférence générale [25], les hauts idéaux des grands savants du XVIII^e siècle, Laplace, Lagrange, Condorcet, Borda et Monge, ont été enfin réalisés. Ceci, grâce en grande partie à la structure mise en place en France à la fin du XIX^e siècle, la Convention du mètre et le BIPM, au sein desquels les grands laboratoires de métrologie du monde entier ont collaboré pour réaliser les progrès remarquables dans le domaine de la science métrologique qui ont permis cet aboutissement, réalisant ainsi la devise «*À tous les temps à tous les peuples*».

On peut dire que, dans tout ceci la France a joué un rôle essentiel, par son institution de la Commission internationale du mètre et sa section française, par son action décisive lors de la Conférence diplomatique du mètre, par, enfin, son accueil depuis 1875 du premier institut scientifique international, le Bureau international des poids et mesures à Sèvres, dont l'un de nous (TJQ) a eu l'honneur d'être directeur de 1988 à 2003.

Remerciements

Un des auteurs, TJQ, voudrait remercier vivement sa belle-sœur Annie Goujard pour toute l'aide qu'elle lui a apportée pour la rédaction en français de sa contribution à cet article.

Références

- [1] P. Méchain, J.-B. Delambre, *Base du système métrique décimal, ou mesure de l'arc de méridien compris entre les parallèles de Dunkerque et Barcelone, exécuté en 1792 et années suivantes, Rédigé par Delambre, 3 tomes, Baudoin, Paris, 1806–1810.*
- [2] P. Bret (dir.), *Œuvres de Lavoisier. Correspondance, Librairie A. Blanchard, Paris, Vol. VI, 1997, Vol. VII, 2013.* [Voir les annexes pour les périodes 1784–1791 et 1792–1794. Un Index alphabétique des noms est disponible].
- [3] A.S. Leblond, manuscrit (nd, ns) 8 pages, pochette de la séance du 12 mai 1790.
- [4] A.S. Leblond, plaquette (15 pages), Imprimerie de Demonville, Paris, 1791.
- [5] Académie des sciences, Paris, Procès-verbaux des séances, consultables aux archives de cette Académie, à la date indiquée ; Bureau des longitudes, Procès-verbaux des séances, numérisés (1795–1932), consultables sur le site du Bureau : <https://site.bdlg.fr/>, à la date indiquée.
- [6] Procès-verbaux de la Conférence géodésique internationale pour la mesure des degrés en Europe réunie à Berlin du 30 septembre au 7 octobre 1867, Neuchâtel, Imprimerie G. Guillaume fils (traduction française par Hirsch à partir de l'allemand).
- [7] G. Bigourdan, *Le Système métrique des poids et mesures, sous-titré «Son établissement et sa propagation graduelle, avec l'histoire des opérations qui ont servi à déterminer le mètre et le kilogramme», Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire, Paris, 1901, p. 253.*
- [8] C. R. Acad. Sci. LXIX (1869) 514–518.
- [9] Commission internationale du mètre, Comité des recherches préparatoires, Paris, avril 1872, Imprimerie Viéville et Capiomont, Paris, 90 p.
- [10] Commission internationale du mètre, Réunions générales de 1872, Imprimerie nationale, Paris, 231 p.
- [11] Commission internationale du mètre, Comité permanent, Procès-verbaux des séances 1872–1873, Imprimerie nationale, Paris, 1873, 40 p. ; également Commission internationale du mètre, Comité permanent, Procès-verbaux des séances 1874, Imprimerie nationale, Paris, 36 p.
- [12] Documents diplomatiques de la Conférence du mètre, Imprimerie nationale, Paris, 1875.
- [13] T.J. Quinn, *From Artefacts to Atoms, the Search for Ultimate Measurement Standards*, Oxford University Press, New York, 2011, pp. 61–63.
- [14] Documents diplomatiques de la Conférence du mètre, Imprimerie nationale, Paris, 1875, p. 92.
- [15] Documents diplomatiques de la Conférence du mètre, Imprimerie nationale, Paris, 1875, p. 144.
- [16] T.J. Quinn, *From Artefacts to Atoms, the Search for Ultimate Measurement Standards*, Oxford University Press, New York, 2011, Chapitres 3 et 4.
- [17] CIPM, Procès-verbaux des séances de 1891, Gauthier-Villars, Paris, 1892, p. 106.
- [18] Comptes rendus des séances de la septième Conférence générale des poids et mesures, 1927, pp. 52–54 et 118.
- [19] T.J. Quinn, *From Artefacts to Atoms, the Search for Ultimate Measurement Standards*, Oxford University Press, New York, 2011, Chapitre 10.
- [20] Comptes rendus des séances de la onzième Conférence générale des poids et mesures, 1960, Gauthier-Villars, Paris, 1960, Résolution 11.
- [21] Comptes rendus des séances de la sixième Conférence générale des poids et mesures, 1921, Gauthier-Villars, Paris, 1921.
- [22] Comptes rendus des séances de la treizième Conférence générale des poids et mesures, 1967, Gauthier-Villars, Paris, 1967–1968.
- [23] J. de Boer, Comptes rendus des séances de la quatorzième Conférence générale des poids et mesures, 1971, Gauthier-Villars, Paris, 1967–1968, p. 54.
- [24] Comptes rendus des séances de la vingt et unième Conférence générale des poids et mesures, Gauthier-Villars, Paris, 1999, Résolution 2.
- [25] CIPM, Comptes rendus des séances de la vingt-sixième Conférence générale des poids et mesures, 2018, Résolution 1 (in press).