

L'histoire du mètre

Sylvie Thiault

L'histoire du mètre est un thème abordé par les nouveaux programmes de l'enseignement scientifique de première générale. Comment s'est imposé la nécessité d'une unité étalon ? Comment les techniques et la science ont-elles mené à la définition actuelle du mètre ? Cet article reprend dans les grandes lignes une présentation faite dans un atelier des journées nationales de l'APMEP 2019 de Dijon.

De la nécessité d'une référence universelle

Les anciennes unités de longueur avaient le plus souvent un rapport avec le corps humain : pied, doigt, palme, coudée... Mais une même dénomination pouvait correspondre à des grandeurs différentes. Suivant le domaine d'activité, les unités étaient différentes : « perche » pour les arpenteurs, « aune » pour les tisserands...

L'Empire romain a institué le pied romain sur toute sa zone d'influence. L'Empire carolingien lui substitue le pied carolingien, avec une correspondance de 16 pieds romains pour 15 pieds carolingiens. Mais cette « universalité » cède devant le pied de Besançon, celui de Vienne ou de Lyon.

Le pied romain, comme le pied byzantin ou le pied carolingien, sont utilisés dans les constructions des édifices religieux.

Avec le système féodal du Moyen Âge, chaque seigneur fixe sa référence, ainsi que le clergé, les villes... Même s'il existe des tables de correspondance entre toutes ces unités, il fallait être habile en calcul. Avec une perche valant 16 pieds romains ou 10 coudées sachant qu'un pied carolingien vaut $\frac{2}{3}$ de coudée, vous aurez calculé que 15 pieds carolingiens valent 16 pieds romains... On utilise également la toise.

Toise vient de "tensa brachia" en latin qui veut dire « bras étendus ».

1 toise = 6 pieds,

1 pied = 12 pouces,

1 pouce = 12 lignes.

Autrement dit 1 toise = 864 lignes...

Mais quel est le pied de référence ? Et donc de quelle toise parle-t-on ?

Dès le Moyen Âge, un étalon de la toise de Paris est installé sur un pilier du Châtelet à Paris (figure 1). C'est une barre de fer terminée à chaque extrémité par deux saillies. L'écart entre les deux saillies mesure une toise. Au fil des siècles cette toise s'use, son support se déforme... En 1668, Colbert décide de la faire restaurer.

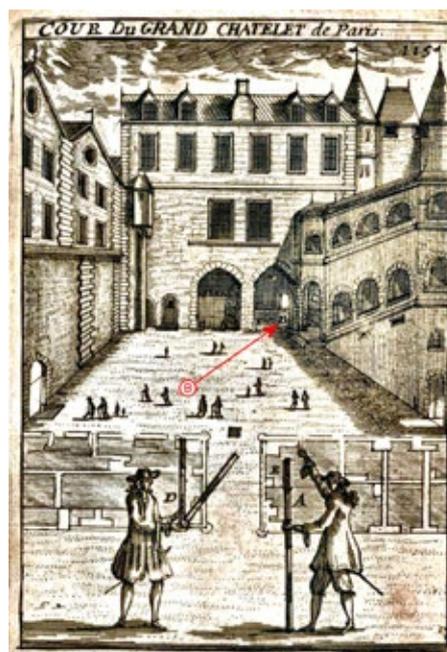


Fig.1. La toise du Châtelet.

Mais la nouvelle toise n'est pas conforme à l'ancienne. Malgré les protestations, Colbert l'impose comme nouvel étalon de mesure du Royaume de France. Plusieurs tentatives pour une uniformisation des unités de mesure ont été proposées par l'état central, mais il n'y a pas eu d'accord sur le choix d'une référence unique. Pourquoi le pied royal français s'imposerait-il sur les autres pieds ?

Exercice

Un pied de roi avant 1668 (pied ancien de roi) mesure 32,6592 cm. Combien mesure une ligne ?

Que mesure une toise en centimètres ?

Réponse : un pouce = 2,7216 cm ;

une ligne = 0,2263 cm ; une toise = 195,9552 cm.

La plupart des gens mesurait moins d'une toise. D'où l'expression « passer sous la toise ».

Exercice: Le pied de roi d'après 1668 mesure 32,4839 cm. De quel pourcentage le pied de roi a-t-il été rétréci en 1668 ?

Réponse : environ 0,5 %.

À la révolution, dans les cahiers de doléances, le tiers état ne veut plus « deux poids deux mesures » et réclame une mesure et un poids universels. Par exemple dans le cahier de Sénéchas (Gard), on lit :

«...37. N'avoir qu'un poids et qu'une mesure. On pourrait former les mesures de capacité et de distance sur le même plan ; par exemple, ne se servir dans les mesures de distance que des expressions de poste, mille, toise, pas, pied, ligne et point ; faire la toise de cinq pieds, le pas de deux pieds et demi ; »

ou dans celui de Luneray (Seine-Maritime) :

...Art. 9. Sur les poids, aunes et mesures...

«...Il serait bien à désirer qu'il n'y eût par tout le royaume qu'un même poids, qu'une même mesure et une même coutume... »

Il faut choisir une référence naturelle indépendante du lieu, du souverain, ou de tout autre pouvoir. Et acceptable par tous, ménageant les susceptibilités de chacun... Ce qui n'est pas une mince affaire !

Deux références naturelles : le pendule et le méridien terrestre

Le méridien terrestre, ou une fraction du méridien terrestre pourrait constituer cette référence universelle. Depuis l'Antiquité, on connaît la méthode pour évaluer le méridien terrestre. Deux mesures sont nécessaires : une mesure de longueur entre deux points d'un même méridien au sol et la mesure de l'angle correspondant, soit la différence de latitude.

Depuis l'Antiquité, les savants cherchent à mesurer la figure de la Terre.

Au III^e siècle avant notre ère, Ératosthène mesure que la distance entre Syène (Assouan) et Alexandrie vaut 5 000 stades. La mesure de l'ombre d'un obélisque à Alexandrie le jour du solstice d'été lui indique que l'arc de méridien entre les deux villes est de 1/50 de cercle, ce qui donne un méridien de 250 000 stades. Converti en mètres, suivant le stade pris comme référence, le méridien mesure entre 39 700 et 46 600 km. On a déjà l'ordre de grandeur !

D'autres mesures ont suivi. À Bagdad, sous l'impulsion du calife al-Ma'mūn, en suivant un méridien dans le désert syrien suivant un degré de latitude, al-Fargāni mesure une distance de 56 plus 2/3 en milles arabes. Avec un mille arabe de 1 995 m, on obtient 40 698 km. En 1527, Jean Fernel compte des tours de roues de charrette entre Paris et Amiens. Il fait des corrections « très empiriques » pour tenir compte des irrégularités du terrain. Il mesure une distance de 56 746 toises pour une toise de 1,95 m. Soit un méridien estimé à 39 835 km.

Il paraît difficile d'obtenir une mesure de précision à partir du méridien terrestre.

En 1581, Galilée (1564-1642) découvre que deux pendules de même longueur oscillent avec la même période. Il y a donc un lien entre longueur et durée. Dès 1670, les astronomes Picard, Huygens et Roemer suggèrent de prendre pour étalon de longueur, la longueur du pendule qui bat la seconde, la seconde étant définie comme une fraction du jour solaire moyen (1/86 400), jour de 24 heures. Tito Livio Burattini (1617-1681) nomme « metro cattolico » (in *Misura Universale*, 1675) la longueur du pendule battant la seconde.

Mais, lors de son expédition à Cayenne pour la mesure de la parallaxe de Mars, Richer constate que le pendule apporté de Paris oscille plus lentement à Cayenne : la longueur d'un pendule qui bat la seconde dépend donc du lieu où l'on se trouve. Il conforte ainsi l'intuition de Newton : la gravité n'est pas la même suivant la latitude à cause de l'aplatissement de la Terre aux pôles et de la force centrifuge. Sans parler de l'influence de la masse des montagnes qui sera mise en évidence ultérieurement. Exit donc le pendule ? Pas si sûr, comme nous le verrons plus loin.

Quelques innovations

En 1533 : Frisius (1508-1555) propose la méthode de triangulation.

En 1585, Simon Stévin (1548-1620), expose dans *la Disme* de ce qu'on appellerait maintenant le système décimal.

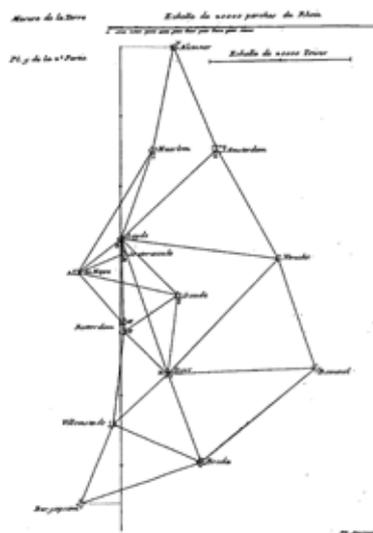


Fig.2. Triangulation principale de Snellius par Cassini.

En 1615 : Snellius (1581-1626), à qui l'on doit la notation avec virgule des nombres décimaux, applique la méthode de Frisius à une chaîne de

triangles entre deux villes des Pays-Bas distantes de 1° de latitude, Almaar et Berg op Zoom. D'après ses mesures, 1° correspond à 55 021 toises.

Mais la base de Snellius est trop courte : 168 toises. L'erreur relative est trop importante.

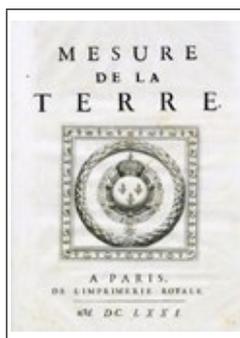
La méthode de triangulation pour une chaîne de triangles

Pour mesurer la distance entre deux lieux A et B d'un même méridien, on utilise une chaîne de triangles adjacents dont les sommets sont situés du part et d'autre du méridien. Et on procède à la triangulation de chacun d'eux, de proche en proche. On détermine la direction de chaque côté par rapport à la direction A-B et on projette les côtés des triangles sur cette direction. Il ne reste qu'à ajouter les mesures des projections pour avoir la longueur AB. Il faut éventuellement tenir compte de la rotondité de la Terre en ayant recours à la trigonométrie sphérique et faire les corrections liées aux « accidents » de terrain.

Enfin il faut également déterminer en degré l'arc de méridien mesuré, c'est à dire la différence de latitude entre les deux extrémités de l'arc de méridien. Pour cela, on relève la hauteur d'une même étoile en chaque lieu lors de son passage au méridien sud et on calcule ainsi la différence de latitude.

La Mesure de la Terre par Picard

Le chemin entre Villejuif et Juvisy, « pavé en ligne droite » constitue la base. Pour mesurer cette base, on utilise des perches en bois de 4 toises (7,8 m), étalonnées par rapport à la toise du Châtelet. La base mesure 5 663 toises à 1 pied près, soit un peu plus de 11 km. Les côtés des triangles mesurent le plus souvent entre 20 et 30 de nos kilomètres, et l'ensemble du maillage s'étend sur plus de 133 km du nord au sud. Picard tient compte des problèmes de réfraction, des différences de hauteur... et fait les corrections. Un arc de 1° du méridien mesure 57 060 toises (111,267 km), avec une incertitude qu'il estime à 60 toises (117 m). Il a disposé d'une grande amélioration technique : la lunette de visée avec réticule qui remplace les pinules.



Picard expose dans son ouvrage *Mesure de la Terre* (1671) l'inconvénient qu'il y a au manque d'unités de mesures universelles. Il suggère le recours à la longueur du pendule qui bat la seconde. Problème, nous l'avons vu, la longueur de ce pendule n'est pas la même suivant le lieu.

Mais au moins aurait-t-on une référence stable pour un lieu donné !

Les grandes expéditions géodésiques

Les grandes expéditions géodésiques du XVIII^e siècle sont organisées pour répondre à la controverse sur l'aplatissement de la Terre : d'après la théorie de Newton, la Terre est aplatie aux pôles. Les cartésiens soutiennent qu'elle est allongée selon l'axe des pôles en conséquence des mesures de méridien complétées après celle de Picard par Cassini. L'expédition vers les tropiques menée par Godin s'est embarquée en 1736 pour le Pérou avec Bouguer, Joseph de Jussieu et La Condamine, emportant avec eux la toise du Pérou. Maupertuis, La Caille, Camus, Clairaut et le Monnier sont partis en 1737 vers le cercle polaire arctique avec la toise du Nord (identique à la toise du Pérou). Dès 1738, l'expédition polaire rapporte la confirmation que la Terre est aplatie au pôle : 1° de méridien mesure 57 422 toises. Bouguer revenu le premier du Pérou en juin 1744 à Paris confirme lui aussi que la Terre est aplatie aux pôles et mesure 56 746 toises pour 1° de latitude. Quant à La Condamine de retour en Europe fin novembre 1744, ses calculs donnent 56 749 toises pour 1° de méridien. C'est la toise du Pérou qui servira alors d'étalon de longueur sous le nom de « toise de l'Académie ».



Fig.3. Maupertuis aplatissant la Terre.

La définition du mètre par la Constituante

8 mai 1790 : sur proposition de Talleyrand, l'Assemblée constituante décide que « l'unité naturelle des longueurs sera celle d'un pendule battant la seconde suivant une latitude à définir en accord avec d'autres pays ».

27 octobre 1790 : l'Académie des sciences adopte le système décimal pour les poids et mesures. Une commission constituée entre autres de Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet est chargée de fixer la base des unités. Il s'agit de choisir une unité incontestable, liée à une référence naturelle, qui

pourra être acceptée par les autres nations.

19 mars 1791 : la commission de l'Académie royale des sciences propose comme étalon de longueur, la dix-millionième partie du quart de méridien terrestre (grand cercle passant par les pôles).

30 mars 1791 : l'Assemblée constituante ordonne la mesure de l'arc de méridien de Dunkerque à Barcelone. Le mètre sera la dix-millionième partie d'un quart de méridien terrestre. Donc le méridien terrestre mesurera 40 000 km. Le méridien sera mesuré aux latitudes moyennes, donc autour de Paris... Delambre et Méchain se chargeront du projet. Ils mesureront en toises la distance entre Dunkerque et Barcelone. Le rapport entre toise et mètre en sera déduit.

Un instrument décisif : le cercle de Borda

C'est un instrument imaginé par Mayer et repris par Borda. Constitué d'un cercle gradué mobile dans son plan autour de son centre, orientable comme on veut avec une lunette sur la face supérieure suivant un diamètre, une lunette sur la face inférieure décalée par rapport au diamètre. C'est une évolution du cercle répétiteur.

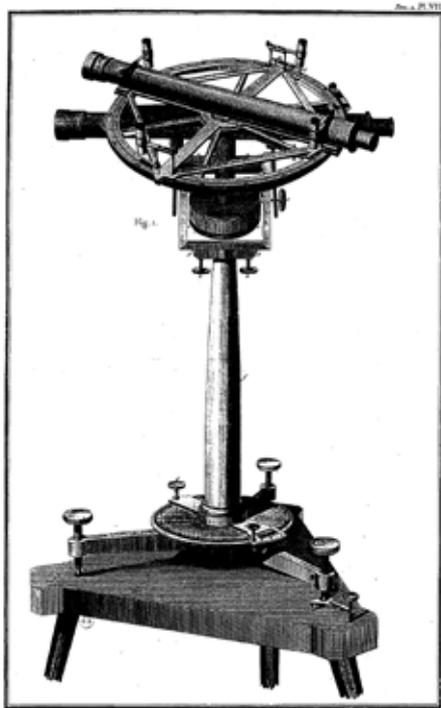


Fig.4. Cercle répétiteur azimutal.

Son avantage ? L'erreur de lecture se répartit sur le « grand angle » obtenu par cumul des visées et l'erreur de pointé se fait aléatoirement dans les deux sens. On a une précision de moins d'une seconde de degré¹.

¹ Vous trouverez une animation GeoGebra à télécharger sur le site (fichier cercle de borda.ggb).

La mesure du méridien de Paris par Delambre et Méchain

Jean-Baptiste Delambre (1749-1822) après s'être fait remarquer par son compte-rendu d'observation du passage de Mercure devant le Soleil du 4 mai 1786, est nommé en 1792 associé-géomètre de l'Académie des sciences.

Pierre-François Méchain (1744-1804) est le découvreur entre 1779 et 1782 d'une trentaine d'objets de Messier. Et en 1782 il entre à l'Académie des sciences. Tous deux ont été les élèves de Jérôme Lalande. En 1788, Méchain est nommé responsable de la *Connaissance des temps*. En 1795, Delambre entre à son tour au Bureau des longitudes.

Delambre terminera sa carrière comme directeur de l'Observatoire de Paris. Quant à Méchain, affaibli après son retour, il n'arrive pas à s'expliquer une erreur sur une mesure de latitude faite à Barcelone, et qu'il n'a pu reprendre du fait des événements. Finalement reparti en 1803 compléter la méridienne vers les Baléares, il meurt de « fièvre tierce » en Espagne l'année suivante. C'est Delambre qui, en 1806, publiera la *Base du système métrique décimal*. Il y expose les conditions particulières dans lesquelles le projet s'est déroulé, le soin extrême qui a été porté aux observations et aux mesures. Il décrit avec minutie les conditions sur le terrain, publie la totalité des données et expose les techniques de calculs qui ont été utilisées.

Mais revenons en 1792. Nous sommes en juin. Tout est prêt... Thermomètres, cercles répétiteurs, règles, niveaux... Le 20 juin, Méchain quitte Paris en direction de Barcelone. Le 21 juin, Delambre part en direction de Dunkerque. Il est prévu qu'ils se rejoignent à Rodez... Les circonstances politiques changeantes rendent difficiles les déplacements et les mesures sont interrompues en 1794. Le 7 avril 1795, sans attendre leur retour, le système métrique décimal est institué. Un mètre étalon provisoire est adopté et diffusé dans toute la France. Il vaut **3 pieds** et **11,44 lignes** de la « toise du Pérou ».

Les mesures sont reprises en 1795 et finalement terminées fin 1798.

Le 27 mai 1799, après vérification et calculs par d'autres savants, le rapport final est publié. Et le 22 juin 1799, les prototypes définitifs en platine du mètre et du kilogramme sont présentés au Conseil des Cinq-Cents et au Conseil des Anciens.

Un mètre vaut **3 pieds** et **11,296 lignes** de la toise de l'Académie.

Exercice

Que vaut une toise de l'Académie en mètre ? On rappelle qu'un pied de roi mesure 32,483 95 cm.

Réponse : 1 toise = 1,949 mètres.

La diffusion de l'usage du système métrique

Après l'adoption par la Constituante du système métrique, des copies de l'étalon en platine sont diffusées dans toute la France. On charge des personnes « compétentes » de porter la bonne parole ; les académiciens s'en occupent. Des ouvrages d'explications sont rédigés. Il s'agit à la fois de remplacer les anciennes unités, mais aussi de faire reconnaître l'avantage du système décimal sur les anciennes pratiques en 1/12, 1/60... Les préfixes pour les sous unités ou pour les sur unités sont mal acceptés. Finalement avec l'avènement du 1^{er} Empire puis la Restauration, l'utilisation des anciennes unités est tolérée. Le décret du 12 février 1812 institue que seul le système métrique sera enseigné dans les écoles, qu'il sera le seul à être utilisé dans les écrits commerciaux et par les administrations. Mais le peuple pourra continuer à utiliser les unités anciennes, avec des correspondances fractionnaires simples avec les unités légales.

1 toise = 2 mètres, 1 pied = 1/3 mètre...

Il faudra attendre le 4 juillet 1837 pour que la loi impose à partir du 1 janvier 1840 le seul usage du système métrique et donc du mètre.

Exercice

Quelle est l'erreur commise en prenant pour équivalence 1 toise = 2 mètres ?

Réponse : 2,6 %

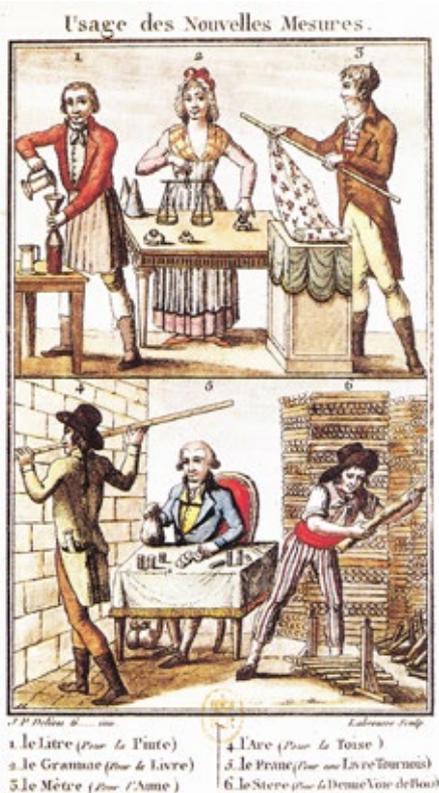


Fig.5. Usage des nouvelles mesures.

La Convention du mètre

Le développement de la technologie et des sciences nécessite une plus grande précision. Les échanges internationaux tant commerciaux que scientifiques nécessitent le recours à des unités comparables d'un pays à l'autre. En 1875, 17 pays dont la France signe la Convention du mètre. Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) est créé. En 1889 se tient la 1^{re} Conférence générale des poids et mesures (CGPM) et les premiers prototypes internationaux des étalons du mètre et du kilogramme sont réalisés et déposés à Sèvres au pavillon de Breteuil, le siège du BIPM.

Jusqu'à la définition actuelle du mètre : la 26^e Conférence générale des poids et mesures, CGPM

En 1960, la 11^e CGPM institue qu'un mètre vaut 1 650 763,73 longueurs d'onde de la lumière d'une transition spécifique de l'isotope 86 du krypton.

En 1983, la 17^e CGPM décide qu'un mètre est la longueur de la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 seconde.

Et dernièrement, en novembre 2018 à Versailles, la 26^e CIPM fixe que sept constantes définissent le Système international d'unités (SI) selon lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{Cs}$ est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à 299 792 458 m/s.

Le mètre est défini à partir de la vitesse de la lumière dans le vide, elle-même définie à partir de la seconde, donc de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{Cs}$. C'est le retour de la seconde pour définir le mètre !

Bibliographie, netographie

Dans les productions du CLEA voir page 36

Un podcast : <https://soundcloud.com/podcastscience/117-la-mesure-de-toute-chose>

À la BnF/Gallica :

- *Mesure de la Terre* par l'abbé Picard.
- *Base du système métrique décimal* par Jean Baptiste Delambre et Pierre Méchain.
- Arrêté du 12 février 1812.
- Instruction sur les poids et mesures métriques (4 juillet 1837)
- Décret du 18 germinal an III sur <https://www.gouvernement.fr/partage/9103-adoption-du-systeme-metrique-decimal>.
- De l'aventure...
- Denis Guedj : *Le mètre du monde* (Éd. Seuil, 2000).
- Ken Alder *Mesurer le monde : 1792-1799, l'incroyable histoire de l'invention du mètre*, (Éd. Flammarion, 2008).
- Florence Tristram : *Le procès des étoiles*.
- Arkan Simaan : *la science au péril de sa vie* (Vuibert/Adapt).
- Un projet international pour refaire la mesure avec vos élèves : <https://www.fondation-lamap.org/fr/eratos>