

Métrodiff, une association pour la diffusion de la métrologie dans le public et dans l'enseignement

La création de l'Association Métrodiff résulte d'une observation : la sensibilisation aux problèmes de la mesure est insuffisante, pour ne pas dire absente au niveau de la formation élémentaire.

La première démarche que la logique impose à notre association est de recenser les besoins auprès des enseignants, auprès des élèves, auprès des techniciens et artisans, jeunes et moins jeunes. Il nous faut comprendre pourquoi et comment une telle lacune a pu se creuser au pays du système métrique décimal.

Le système métrique décimal, modèle métrologique

La fondation du Système métrique décimal, le 18 Germinal an III (7 avril 1795) peut être considérée comme la naissance de la métrologie.

C'est en effet la première fois que le problème des mesures a été abordé de façon scientifique, par une commission de l'Académie des Sciences de Paris à laquelle contribuèrent Condorcet, Coulomb, Lavoisier, Lagrange, Laplace, Monge et quelques autres.

La première innovation fut de créer un système de mesures uniformément décimal, calqué sur le système de numération à base 10, universellement utilisé; au lieu de multiples et sous-multiples échelonnés suivant les premiers nombres entiers, 2, 3, 4, 6, 8, 9, plus rarement 5 ou 7, dont l'enchaînement conduisait aux "rapports simples" tels que 12, 16, 18, 24, 32, jusqu'à 60, les multiples et sous-multiples dans le nouveau système devaient être échelonnés suivant les rapports 10, 100, 1000, quelle que soit l'unité considérée.

Pour désigner ces multiples et sous-multiples décimaux, il suffisait d'accoler un préfixe au nom de l'unité, quelle qu'elle soit, préfixe inspiré du latin pour les sous-multiples : deci, centi, milli respectivement pour 0,1, 0,01, 0,001, et du grec pour les multiples : deca, hecto, kilo, myria, respectivement pour 10, 100, 1000, 10000.

La seconde innovation fut de créer, ou tout au moins d'ébaucher, un système cohérent en s'appuyant sur des lois physiques simples : à partir du mètre, l'unité de longueur, on créa le mètre carré, unité d'aire, et le mètre cube, unité de volume, puis le kilogramme, poids d'un décimètre cube d'eau pure.

Partant d'une seule unité de base, on pouvait ainsi établir toutes les unités dérivées nécessaires pour les échanges commerciaux usuels.

Tout le système reposait donc sur l'unité de longueur. Il fallait choisir pour celle-ci une définition fondée sur un étalon naturel, universel, indestructible. Le choix se porta sur la longueur d'un arc du méridien terrestre. Les mêmes exigences conduisirent à fonder l'unité de poids sur celui d'un volume connu (un décimètre cube) d'eau pure, liquide naturel, universel, accessible en tout temps et en tout lieu.

La mise en œuvre de ces deux définitions demanda un travail considérable. Pour assurer un accès pratique aux nouvelles unités de longueur et de poids, on avait prévu dès l'origine de fabriquer des étalons du mètre et du kilogramme, représentations pratiques de ces deux unités, constituées du métal le plus inaltérable connu, le platine. Une règle de platine de longueur ajustée à un mètre et un cylindre de platine dont le poids avait été ajusté à un kilogramme furent déposés aux Archives de la République

et devinrent les étalons de référence pour la diffusion du Système métrique décimal.

Le rôle de ces deux étalons fut fondamental. Leur conservation à long terme mit fin à un désordre chronique : les tribunaux étaient jusque là submergés de procès interminables relatifs à des mesures dont les étalons avaient depuis longtemps disparu, désordre accentué par les dénominations incohérentes attribuées aux unités en usage suivant le lieu ou la nature de l'objet considéré.

La diffusion du Système métrique décimal

Il fallait enseigner aux usagers les principaux aspects de ce nouveau système de mesures. Les pères fondateurs avaient prévu dès l'origine la publication et la large distribution de brochures décrivant le système, donnant la correspondance des nouvelles unités avec les anciennes. Dans ce but, ils avaient prévu de rassembler les étalons en usage pour ces anciennes mesures. Cette dernière partie du travail s'avéra gigantesque. La première partie, la diffusion de documents décrivant les nouvelles mesures, fut largement menée à bien. On trouvait encore dans les écoles primaires il y a moins d'un siècle, des tableaux destinés à enseigner par l'image les principaux instruments de mesure aux écoliers.

La difficulté principale rencontrée par cette tâche de diffusion fut la force de l'habitude et la résistance au changement qui en résulta. Après quelques mesures législatives dont l'objectif était de satisfaire les récalcitrants mais dont l'effet fut surtout de maintenir et même d'accentuer le désordre, le nouveau système ne devint obligatoire en France qu'en 1840, alors qu'il l'était déjà aux Pays-Bas depuis 1816.

La logique, la garantie de permanence et l'uniformité du système assurèrent son succès dans les milieux scientifiques et techniques. Il contribua au développement industriel et commercial pendant près d'un siècle sans problème.

Les nouveaux problèmes

C'est le développement de la géodésie, lié à celui des chemins de fer, avec leurs tunnels, qui révéla une faiblesse du Système métrique décimal.

La propagation des unités, surtout de l'unité de longueur, était mal assurée à partir des étalons des Archives. Les réseaux géodésiques dressés dans les différents Etats se raccordaient mal aux frontières.

La solution qui s'imposa en 1875, par un traité signé entre 18 Etats, la Convention du Mètre, fut d'établir de nouveaux étalons, internationaux et nationaux, aussi identiques que possible entre eux et avec les étalons des Archives. Il fallait aussi créer un laboratoire scientifique international, le Bureau international des poids et mesures (BIPM) pour assurer et vérifier l'uniformité de ces étalons et leur pérennité.

L'étude scientifique montra que les nouveaux étalons pourraient assurer une meilleure uniformité et pérennité en les fabriquant en platine allié à 10 % d'iridium, avec des exigences très sévères concernant la pureté des matériaux. Pour les mètres, on utilisa des barres dont la section droite, en X, assurait une rigidité très supérieure à celle du Mètre des Archives.

Mis à part ces quelques perfectionnements métrologiques, on ne mit pas en cause la nature décimale du système, ni le rattachement aux étalons naturels, méridien et décimètre cube d'eau pure, ni le rattachement cohérent des unités dérivées aux unités de base.

Le raccordement aux étalons des Archives soulignait l'importance de la continuité : les nouveaux étalons devaient permettre des mesures plus précises qu'auparavant, mais les mesures usuelles restaient inchangées.

L'élaboration et la comparaison des nouveaux étalons attira l'attention sur quelques problèmes d'ordre scientifique. La comparaison deux à deux de ces nouveaux étalons montra l'importance des

corrections destinées à compenser les effets de diverses grandeurs d'influence : température et dilatation, poussée de l'air et masse volumique, gravité et déformations élastiques. Ces corrections elles-mêmes ne pouvant être qu'imparfaites, elles laissaient subsister des erreurs résiduelles, ce que nous appelons aujourd'hui des incertitudes, qui ne supprimaient pas les écarts observés entre des mesures répétées. Ainsi s'imposa le concept d'erreurs aléatoires, dues aussi bien aux moyens d'observation mis en œuvre qu'à la qualité propre des étalons observés, laissant subsister une incertitude sur les résultats des mesures les plus raffinées.

D'où l'importance des méthodes statistiques.

L'étude des grandeurs d'influence montra aussi l'importance de nouveaux domaines:

Température et dilatation pour lesquelles il ne suffisait pas de se référer à des points fixes mais on avait besoin de définir une échelle universelle de température, l'échelle thermodynamique, que l'on savait matérialiser à l'aide de thermomètres à gaz;

Pression déjà envisagée comme grandeur d'influence par l'intermédiaire de la pression atmosphérique, mais dont le rôle industriel se développait avec la machine à vapeur.

Electricité avec les besoins de l'industrie électrique: éclairage, force motrice, câbles télégraphiques intercontinentaux.

Temps avec le développement des transports ferroviaires et maritimes, support des échanges commerciaux internationaux.

Les nouvelles unités, le SI

Le besoin d'unités adaptées aux nouveaux domaines d'importance économique se manifesta de façon exemplaire dans le domaine de l'électricité.

Convaincus des avantages du Système métrique décimal, les scientifiques du 19^e siècle s'efforcèrent de fonder des unités électriques et magnétiques dérivées à partir des forces qui s'exerçaient entre charges électriques ou entre aimants, forces dont Coulomb avait établi les premières lois. Par chance, les unités qui furent élaborées à cette époque se fondèrent sur des unités métriques, le centimètre, le gramme et la seconde, donnant naissance aux unités dites C.G.S.. Les unités magnétiques s'étendaient sans trop de difficultés aux effets magnétiques des courants électriques. Cependant le double point de départ des unités C.G.S. conduisait à deux ensembles d'unités, les unes partant de l'électrostatique, les autres partant de l'électromagnétisme. Ces deux ensembles restaient incompatibles lorsqu'on voulait interpréter le courant électrique comme résultant de la mise en mouvement des charges électriques portées par les électrons.

Ce fut Giorgi qui suggéra, vers 1900, d'ajouter aux unités de base du Système métrique, mètre, kilogramme et seconde, une quatrième unité de base propre à l'électricité, par exemple l'ampère. Il fallut un demi-siècle pour que cette proposition s'impose, après des discussions passionnées, sinon passionnantes.

Une démarche analogue conduisit à adopter une autre unité de base pour la mesure des températures. Cette nouvelle unité se fonde sur le concept de température thermodynamique, remplaçant les diverses échelles : Réaumur, Fahrenheit, centigrade.

Une sixième unité de base s'avéra nécessaire pour mesurer la lumière visible, en raison du développement de l'industrie de l'éclairage. Elle s'appela successivement bougie décimale, bougie nouvelle et finalement candela, au fur et à mesure du développement des techniques;

Tous ces développements conduisirent à créer le Système international d'unités, SI, en 1960, avec les

six unités de base : mètre (m), kilogramme (kg), seconde (s), ampère (A), kelvin (K) et candela (cd) et un grand nombre d'unités dérivées cohérentes dont une vingtaine ont reçu des noms spéciaux : pascal, newton, joule, watt, volt, ohm, etc...

Récemment encore, les besoins de la métrologie en chimie ont conduit à adapter, en 1971, une septième unité de base dans le SI, la mole (mol). Cette unité est utilisée depuis longtemps par les chimistes. Elle correspond aux symboles chimiques tels que O, H, N, désignant respectivement une mole d'atomes d'oxygène, d'hydrogène ou d'azote. Mais il a fallu attendre jusqu'à cette époque récente pour pouvoir donner de la mole une définition précise. En particulier, il fallait tenir compte du fait que les corps simples naturels sont presque tous constitués de mélanges d'isotopes, en proportions diverses, variables suivant l'origine naturelle, isotopes que la chimie ne permet pas de distinguer.

Le S.I. héritier du Système métrique décimal

Ce sont les principes qui s'étaient dégagés au cours de près de deux siècles d'usage du Système métrique décimal qui ont permis de fonder le SI sur des bases solides, assurant son succès mondial.

Le but du SI est d'assurer l'uniformité et la pérennité des mesures en construisant un système d'unités fondé sur un petit nombre d'unités de base, à partir desquelles on construit un système complet d'unités dérivées cohérentes en utilisant les lois les plus simples de la physique, lois qui se traduisent par des relations algébriques où ne figure aucun facteur numérique arbitraire.

Ce système doit pouvoir s'adapter aux besoins nouveaux et au progrès des sciences et des techniques.

Il faut pour cela changer de temps en temps la manière de définir les unités de base et les étalons qui servent à les représenter, pour assurer une meilleure exactitude des mesures. Ces changements doivent se faire sans perturber l'usage courant, en conservant la "taille" des unités. Les mesures anciennes restent valables, compte tenu de leur plus grande incertitude.

L'évolution du système peut être illustrée par l'histoire du litre.

1795 : Le kilogramme est défini comme la masse d'un décimètre cube d'eau pure (à la température de son maximum de densité).

Le décimètre cube prend le nom de litre.

1901 : Pour les mesures de haute précision, on appellera litre le volume occupé par un kilogramme d'eau pure à son maximum de densité (4°C) et sous la pression atmosphérique normale.

1960 : Il y a une différence relative d'environ 28 millièmes entre le décimètre cube et le litre.

1961 : En conséquence, les résultats des mesures précises de volume doivent être exprimés en unités du SI et non en litres.

1964 : La définition du litre donnée en 1901 est abrogée ; la recommandation de 1961 est confirmée ; le mot litre peut être utilisé comme nom spécial donné au décimètre cube.

1979 : Afin d'éviter les confusions possibles entre le symbole l du litre et le chiffre 1, les deux symboles l et L sont admis pour représenter le litre.

Conclusions de cette histoire :

Les mesures précises de volume, soit de capacité d'un récipient, soit du volume déplacé par un solide immergé, peuvent être déduites de la pesée du volume d'eau pure contenu par un récipient ou déplacé par un solide, mais on doit tenir compte de la masse volumique de l'eau qui dépend de la température

(des tables existent et sont périodiquement révisées). De plus l'eau a une composition isotopique (deutérium, oxygène 17 et 18) légèrement variable suivant son origine (fusion des glaces polaires, océans) et sa teneur en gaz atmosphériques dissous est variable. Ces derniers effets se traduisent par des variations relatives de masse volumique de l'ordre du millionième.

Bien entendu, les pesées pour déterminer une masse d'eau doivent tenir compte de la poussée de l'air ambiant qui allège apparemment la masse d'un litre d'eau de 1,3 grammes.

La nécessité de tenir compte de la différence entre le litre et le volume occupé par un kilogramme d'eau pure ne s'est imposée que progressivement, au fur et à mesure du perfectionnement des mesures de volume et de masse volumique. Les changements enregistrés dans l'histoire du litre traduisent cette évolution. Compte tenu des incertitudes qui leur sont liées, les mesures anciennes restent cohérentes avec les mesures les plus récentes.

Conclusion générale

La plupart des éléments de la métrologie moderne ont été mis en œuvre dès la fondation du Système métrique décimal.

La définition des unités doit leur assurer universalité et pérennité. Elle peut conduire à une réalisation, mise en œuvre de la définition, quelquefois difficiles qui demandent généralement l'expérience d'un laboratoire scientifique spécialisé. La réalisation de la définition permet de fabriquer des étalons, représentations pratiques des unités. On distingue habituellement des étalons primaires, établis par un laboratoire qualifié à partir de la définition de l'unité, et des étalons secondaires, établis par comparaison aux précédents, destinés à un usage plus courant et qui peuvent eux-mêmes servir à étalonner des étalons de rang inférieur. On distingue ainsi une hiérarchie des étalons suivant la longueur de la chaîne d'étalonnage.

Les incertitudes s'accumulent tout au long de cette chaîne, ce qui conduit à des étalons d'usage courant, exposés à des risques d'usure, de vieillissement, de pollution, dont la valeur doit être vérifiée périodiquement par rapport à des étalons de rang supérieur.

L'accumulation des incertitudes tout au long de la chaîne de raccordements exige pour chaque étalonnage de pouvoir reconstituer cette chaîne, jusqu'aux étalons primaires, ce que l'on appelle aujourd'hui la traçabilité, nécessaire pour établir l'incertitude transmise par un étalon d'usage à un instrument de mesure.

Tout ceci s'applique aussi bien à la réalisation d'une unité dérivée qu'à celle d'une unité de base.

Un type particulier d'étalon est constitué par certaines constantes naturelles que l'on peut considérer comme des points fixes. C'est le cas des points fixes de température, points de fusion ou points triples de corps purs, couramment utilisés en thermométrie ; c'est aussi le cas de la masse volumique de l'eau ou du mercure, de la conductivité électrique ou thermique de divers métaux purs. De telles constantes ne peuvent acquérir un statut d'étalons qu'après une étude approfondie des diverses influences auxquelles elles peuvent être soumises. L'histoire du litre est, à cet égard, exemplaire.

Au prix d'une étude scientifique très soignée, de telles constantes peuvent fournir universalité et pérennité, les qualités essentielles de tout étalon.

Au-delà du Système métrique décimal

Certaines conceptions actuelles de la métrologie ne sont pas à proprement parler incluses dans le Système métrique décimal, mais elles ont largement bénéficié de la pratique de la mesure que la mise en œuvre de ce système a permis de répandre. L'une des conquêtes de la métrologie a été la mise en œuvre du concept d'incertitude, qui s'est largement substitué aujourd'hui au concept d'erreur. Le

concept d'erreur est commode, en particulier pour l'enseignement élémentaire, mais il se heurte à quelques problèmes pratiques. L'erreur étant présentée comme un écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie, il va de soi que la valeur vraie est le plus souvent inconnue, puisque c'est elle que la mesure cherche à évaluer. L'erreur est donc, par essence, inaccessible. Même lorsqu'on utilise un étalon pour vérifier l'indication donnée par un instrument de mesure, on doit considérer que l'on attribue à l'étalon une « valeur conventionnellement vraie », ce qui suppose, au moins, que l'incertitude attachée à cette valeur est suffisamment faible pour ne pas contribuer de façon significative à l'erreur d'étalonnage mesurée.

Le concept de valeur vraie implique lui-même que l'on devrait disposer d'une définition parfaite de l'objet considéré. C'est souvent la définition elle-même de l'objet qui fournit la contribution principale à l'incertitude de sa mesure.

Une autre contribution essentielle de la pratique du Système métrique a été de préciser les conditions nécessaires pour établir des unités dérivées cohérentes. On s'appuie pour cela sur des relations algébriques simples résultant de l'étude des phénomènes physiques. Cette étude doit souvent s'appuyer sur des mesures préalables, fondées sur des échelles empiriques, que je préfère appeler échelles provisoires. L'étude des phénomènes observés permet ensuite de dégager les relations nécessaires pour définir des unités cohérentes.

Ces mesures empiriques font l'objet de normes, sur lesquelles on construit des échelles de mesure. Le plus souvent, il existe plusieurs normes et plusieurs échelles pour mesurer un même type de phénomène. C'est le cas, par exemple, des anciennes échelles de température, des diverses calories, des échelles de dureté, des échelles d'efficacité des produits pharmaceutiques.

Le problème de ces grandeurs, que l'on appelle en français grandeurs repérables, est qu'il s'agit chaque fois de démêler un ensemble complexe de phénomènes dont la contribution est variable suivant le moyen d'observation mis en œuvre.

La mise en œuvre de références provisoires pour étudier ces phénomènes est avant tout un problème d'étude scientifique.

Voilà, rapidement esquissé, un résumé des concepts et des problèmes essentiels que l'enseignement de la métrologie devrait faire connaître à un large public.

Pierre Giacomo, Président de l'Association METRODIFF -2001-
<http://www.metrodiff.org/>