

La définition du mètre

P. BOUCHARÉINE
Institut National de Métrologie (CNAM)

RÉSUMÉ

On donne la définition proposée par la septième session du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre et ses différents aspects sont discutés. Après un rappel des résultats expérimentaux qui ont conduit à ce choix, on analyse les conséquences de ce changement de définition de l'unité de longueur sur la structure du Système International d'Unités, sur la nouvelle relation entre longueurs et temps et la conséquence sur la mesure des vitesses, sur la réalisation de l'étalon primaire de longueur, et sur les mesures pratiques.

ABSTRACT

The new definition proposed by the 7th session of the "Comité Consultatif pour la Définition du Mètre" is given and discussed. After an historical review of experimental results which are responsible for this choice, the consequences of the change in the definition of the unit of length are examined concerning the structure of the "Système International d'Unités", the relation between lengths and time and its impact on speed measurements, the realization of length primary standard and practical measurements.

Au cours de sa septième session tenue au Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres en juin 1982 le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre, réunissant une quinzaine de scientifiques venus des cinq continents, s'est prononcé à l'unanimité en faveur d'une nouvelle définition de l'unité de longueur. Déjà soumise au Comité International des Poids et Mesures, cette définition pourrait être promulguée par la prochaine Conférence Générale des Poids et Mesures qui doit se tenir en 1983.

D'après cette nouvelle définition, le mètre serait "la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière en $1/299\,792\,458$ de seconde".

Nous rappellerons dans une première partie les raisons qui ont conduit à une telle décision. Nous analyserons ensuite les conséquences de ce changement, d'abord sur la structure du Système International d'Unités (SI), puis sur la mesure des longueurs, aussi bien au niveau des étalonnages et de l'étalon primaire que des mesures pratiques.

1 — POURQUOI CETTE DÉFINITION ?

La valeur actuelle du mètre est la conséquence du choix de la première définition proposée par l'Académie des Sciences et adoptée en 1791 par l'Assemblée Nationale : "Le mètre est la dix millionième partie du quart du méridien terrestre". Cette définition s'appuyait sur une référence naturelle et à la disposition de tous ; c'était un progrès considérable que de remplacer les nombreuses références artificielles et indépendantes les unes des autres par un étalon unique. Les multiples et sous-multiples du mètre furent en même temps définis sur la base de la décimalisation, et cette propriété fut certainement décisive dans le rôle que joua plus tard le Système Métrique français dans l'établissement en 1875 du Système International.

Pour matérialiser cette définition, et après la campagne épique de trois académiciens au Pérou, La Condamine, Bouguer et Godin (1), les mesures effectuées par Delambre et Méchain d'un arc de méridien entre Dunkerque et Barcelone donnèrent au mètre la valeur de 0,513074 toise (2). Comme ces mesures géodésiques conduisaient à des campagnes de longue haleine, on les concrétisa par la réalisation d'une

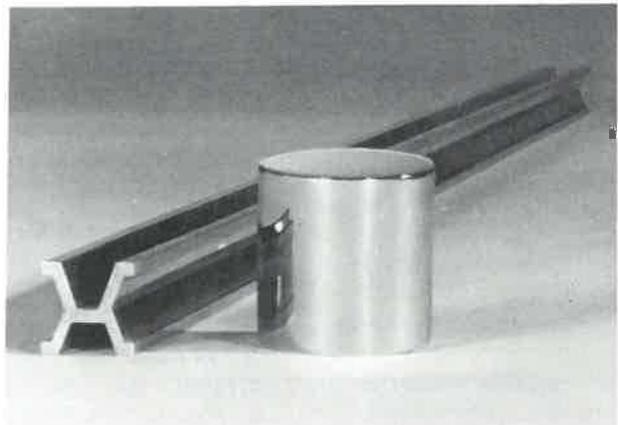


Fig. 1 : Les Prototypes internationaux en platine iridié du mètre et du kilogramme sont les modèles de l'étalon primaire unique et artificiel, seul objet sur lequel s'appuie la définition de l'unité. Ce type d'étalon rend difficile la dissémination des références ; en ce qui concerne le kilogramme, on n'a encore rien trouvé d'aussi exact (Doc. BIPM).

règle à bouts en platine, le "Mètre des Archives". D'un usage plus commode, et surtout permettant des mesures plus précises, le Mètre des Archives devint le support d'une nouvelle définition en 1799. Les possibilités de la technique avaient contraint les scientifiques à sacrifier le caractère naturel et universel de l'étalon terrestre.

Lorsqu'en 1875, 17 états signèrent la "Convention du Mètre" instituant le Système International d'Unités, c'est le Système Métrique français qui servit de modèle, et le mètre fut défini à partir d'une règle à traits, en platine iridiée et à laquelle un profil adapté donnait des qualités mécaniques optimales. Le "Prototype International" du mètre avait été choisi parmi une vingtaine de règles identiques comme s'approchant le mieux de la longueur du Mètre français, lequel s'est d'ailleurs avéré trop court de 0,2 mm pour représenter la première définition.

Dès 1892 les mesures interférentielles effectuées par A. MICHELSON et J.-R. BENOÎT au Bureau International des Poids et Mesures (3) attirèrent l'attention des physiciens sur l'intérêt des radiations atomiques comme références de longueurs d'onde. Cet intérêt fut confirmé quatorze ans après par les travaux que Charles FABRY effectua au Conservatoire National des Arts et Métiers à l'aide de son interféromètre à ondes multiples. C. FABRY fut le premier à remarquer la grande finesse spectrale des radiations émises par le Krypton à basse température (4) (5).

Ce n'est pourtant qu'en 1952 que fut créé le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre pour étudier les possibilités de définir l'unité de longueur à partir de la longueur d'onde d'une radiation atomique. A la suite de discussions nombreuses et animées, le choix fut fait d'une radiation de l'isotope 86 du Krypton pour la définition, toujours en vigueur actuellement, promulguée par la 22^e Conférence Générale des Poids et Mesures réunie au Bureau International en octobre 1960 :

"Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de Krypton 86 ".

Le principal mérite de cette définition était de faire passer l'incertitude de l'étalon primaire des quelques dixièmes de micromètre liés à la lecture au microscope des traits du Prototype International à quelques nanomètres liés à la lecture de la phase des signaux interférentiels. Mais cette définition redonnait également au mètre le caractère naturel qu'on avait cherché dans le méridien terrestre. L'atome apporte au métrologue les meilleures garanties d'universalité et de pérennité, qualités essentielles pour un accès commode à l'étalon primaire.

Cette définition n'était pas encore promulguée que l'on parlait déjà de masers optiques ou lasers, dont les qualités exceptionnelles de pureté spectrale se firent immédiatement remarquer. Au cours de la troisième session du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre tenue à Sèvres en octobre 1962, P. CONNES est venu présenter aux métrologues ces nouvelles sources de lumière. Après avoir insisté sur la nécessité d'asservir la fréquence de résonance de la cavité optique sur une référence stable, sous peine de retrouver dans la longueur d'onde les instabilités à

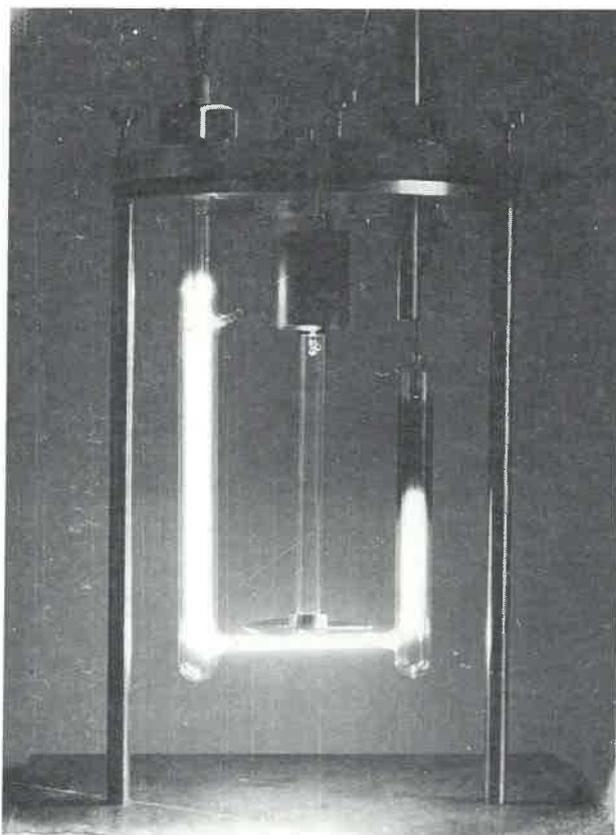


Fig. 2 : La lampe à Krypton permet de matérialiser l'actuelle définition du mètre, à condition de lui adjoindre un monochromateur et un interféromètre. L'étalon primaire est ainsi à la portée de tout laboratoire bien équipé.

long terme de la cavité optique responsable de la fréquence de l'oscillation, il conclut ainsi son exposé : "l'interconnexion que le laser permet d'établir entre les mesures de longueur et les mesures de fréquence sera très fructueuse" (6). Les événements allaient confirmer ce point de vue beaucoup plus vite que personne n'aurait pu le penser à l'époque.

C'est en effet en 1969 que R.-L. BARGER et J.-L. HALL (7) réussirent à stabiliser la fréquence d'un laser hélium-néon oscillant à 88 THz (longueur d'onde 3,39 μm) sur une transition moléculaire du méthane. Mettant à profit la finesse spectrale du laser, ils purent s'affranchir, par le phénomène de l'absorption saturée, de l'effet Doppler-Fizeau lié à l'agitation thermique des molécules de méthane. Cette sélection des molécules dénuées de décalage Doppler-Fizeau (ce sont les molécules qui se déplacent dans une direction perpendiculaire au faisceau absorbé) est beaucoup plus simple à mettre en œuvre qu'un jet moléculaire, et elle est plus efficace, le nombre de molécules concernées étant beaucoup plus important. La durée de vie d'une cellule pour absorption saturée est pratiquement illimitée.

Sur ce laser stabilisé, dont les défauts de répétabilité de la fréquence n'excèdent pas quelques 10^{-14} en valeur relative, on put faire une mesure de la longueur d'onde dans le vide avec une incertitude de quelques 10^{-9} principalement due à l'incertitude de l'étalon de longueur, et, grâce aux nouvelles diodes métal-isolant-métal dont la bande passante atteint la centaine de térahertz, une équipe du Massachussets

Institute of Technology put faire une mesure de fréquence (8) avec une incertitude relative de quelques 10^{-10} . De ces deux mesures on tira la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide avec une incertitude cent fois plus faible que dans les mesures précédentes, incertitude essentiellement due à la définition même de l'unité de longueur :

$$c = \lambda \cdot \nu = 299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ m/s}$$

Dès l'obtention de ces résultats expérimentaux (1972), l'insuffisance de l'étalon primaire de longueur résultant de la définition de 1960 devenait flagrante. Alors que la règle en platine avait rempli son office pendant 85 années, la longueur d'onde de la radiation du Krypton, qui avait fait progresser l'exactitude d'un facteur 100, était tombée en obsolescence après dix ans d'existence.

Le réflexe le plus naturel était alors de remplacer simplement la longueur d'onde du Krypton par celle du nouveau laser. Mais c'est s'exposer à de très fréquents changements d'étalon, les progrès technologiques dans ce nouveau domaine risquant d'être très rapides. D'autre part la valeur de c donnée ci-dessus est venue remplacer la valeur recommandée jusque là par l'Union Astronomique Internationale, et venant des mesures du britannique K.-D. FROOME sur des mesures de longueurs d'onde centimétriques :

$$c = 299\,792,5 \text{ km/s.}$$

De nombreux utilisateurs de cette valeur (spectroscopistes, astronomes, géophysiciens) ont du revoir de longues tables numériques (longueurs d'onde, nombres d'ondes, éphémérides, etc.). Ces révisions se traduisent par des périodes transitoires inévitables au cours desquelles règne une certaine incohérence. L'ensemble de la communauté scientifique est donc intéressée à ce que la valeur numérique d'une constante aussi fondamentale que la vitesse de la lumière dans le vide reste inchangée (9). Enfin le choix de la définition d'une unité permet d'annuler l'incertitude sur une valeur numérique : ce fut successivement celle de la longueur du méridien terrestre, de la longueur du Prototype International en platine, de la

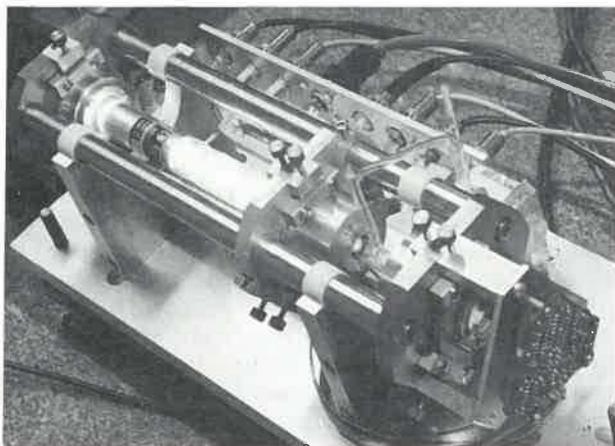


Fig. 3 : Les lasers stabilisés ont détrôné la lampe à Krypton dix ans après que celle-ci ait été choisie comme support de la définition du mètre. La future définition aura l'avantage de pouvoir exploiter les qualités de tout nouveau type de laser. L'exemplaire ci-dessus est un laser hélium-néon stabilisé par absorption saturée dans l'iode. C'est le plus répandu.

La limitation principale à l'exactitude de la longueur d'onde dans le vide de la radiation du Krypton est liée à l'agitation thermique des atomes de Krypton et à l'effet Doppler-Fizeau qui en résulte. Cet effet se traduit par un profil spectral gaussien dont la largeur peut s'exprimer en fonction de la température T , de la masse m des atomes, de la constante de Boltzmann k et de la vitesse de la lumière c :

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}}$$

Par la très basse température (63 k) qu'ils permettent d'atteindre et leur masse élevée, les atomes de Krypton sont ceux qui donnent la plus faible valeur du rapport T/m , et par conséquent la meilleure finesse spectrale d'une source de type classique.

Dans un laser les atomes ne servent que d'amplificateur et à l'intérieur de la bande spectrale déterminée par l'élargissement spectral de la transition, ils ne déterminent pas la fréquence de l'oscillation. Celle-ci est fixée par la longueur L de la cavité optique du laser et la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques c :

$$\nu = \frac{Nc}{2L}$$

où N est un nombre entier (de l'ordre de quelques 10^5 à 10^6) caractérisant l'ordre d'un mode longitudinal de la cavité. Par l'émission induite, l'onde stationnaire résonnante sélectionne dans le profil spectral ceux des atomes pour lesquels la fréquence apparente, compte tenu de l'effet Doppler-Fizeau, est égale à celle de la cavité. C'est ainsi que dans le rayonnement laser, l'élargissement dû à l'agitation thermique est éliminé pour les atomes. L'agitation thermique de la cavité elle-même reste négligeable, ainsi que les fluctuations de fréquence dues au bruit du système amplificateur, essentiellement apporté par l'émission spontanée des atomes. Ce sont des paramètres technologiques qui limitent la stabilité de fréquence à court terme d'un laser à quelques 10^{-14} ou quelques 10^{-12} , suivant les conditions de fonctionnement. A long terme, la fréquence d'un laser est perturbée par les dérivés mécaniques et thermiques de la longueur L de la cavité, qui doit donc être rattachée à une référence atomique ou moléculaire.

longueur d'onde de la radiation orangée du Krypton. Annuler cette incertitude sur la vitesse de la lumière est certainement plus fondamental. Les expériences de MICHELSON et MORLEY, rééditées récemment par A. BRILLET et J. HALL avec une sensibilité plus de mille fois meilleure grâce au laser stabilisé sur le méthane (10), et la théorie de la relativité ont donné à cette constante fondamentale une importance toute particulière.

C'est la raison pour laquelle le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre a décidé de rattacher l'unité de longueur à l'unité de temps en fixant conventionnellement une valeur exacte par définition à la vitesse de la lumière dans le vide. De nombreuses discussions ont eu lieu sur la forme à donner à la définition du mètre (11), et c'est finalement celle exprimée en tête de cet article qui a été retenue.

2 — LES CONSÉQUENCES DE LA NOUVELLE DÉFINITION SUR LA STRUCTURE DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS

Ainsi le mètre ne sera plus défini par une référence indépendante, mais par rapport à la seconde par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière dans le vide dont la valeur numérique est implicitement fixée par la nouvelle définition à 299 792 458 m/s.

Certains ont vu dans cette démarche la disparition du mètre en tant qu'unité de base du Système International, les longueurs étant remplacées par les vitesses et devenant une grandeur dérivée des temps et de la vitesse de la lumière. Il aurait pu en être ainsi, si les vitesses pouvaient se mesurer avec une meilleure exactitude que les longueurs, en définissant une unité de vitesse comme la 1/299 792 458^e partie de la vitesse de la lumière dans le vide. Il aurait fallu trouver un nom à cette unité (par exemple le fizeau) et le mètre serait devenu le fizeau seconde *. Mais avec la définition proposée il n'en est rien : c'est l'unité de longueur, le mètre, qui est définie, et les vitesses continueront à s'exprimer en mètres par seconde.

La nouvelle définition ne modifie donc pas la structure du Système International : le mètre et la seconde restent deux unités de base de deux grandeurs physiques de base, les longueurs et les temps. Seules les tailles de ces unités ne sont plus indépendantes, mais reliées par la valeur exacte affectée à la vitesse de la lumière. Un seul changement d'ordre administratif sera nécessaire : il faut d'abord définir la seconde pour pouvoir donner une définition non ambiguë du mètre. Or traditionnellement, c'est toujours la définition du mètre que l'on donnait en tête des unités du système métrique. Souhaitons seulement que le Système International d'Unités n'en devienne pas un système secondaire !

Une conséquence plus sérieuse pourra peut-être apparaître au niveau de la mesure des vitesses, mais elle est pour l'instant purement conjecturale. La mesure d'une vitesse comporte celle d'une longueur L et d'un temps T dont on calcule le rapport $V = L/T$. L'incertitude sur la vitesse est une combinaison des incertitudes sur la longueur et sur le temps, et ces incertitudes étaient jusqu'ici indépendantes au niveau des étalons primaires. Il en résulte qu'une mesure de vitesse ne pouvait pas se faire avec une incertitude relative inférieure à l'une ou l'autre des incertitudes relatives au niveau de ces étalons. Avec la nouvelle définition, ces incertitudes au niveau des étalons ne sont plus indépendantes ; leur corrélation pourrait être telle que l'incertitude sur le rapport L/T soit inférieure à une, ou même aux deux incertitudes relatives sur les unités de longueur et de temps. Par exemple, dans une expérience (qui pour l'instant n'est pas pratiquement envisageable, à ma connaissance) où la vitesse d'une particule serait directe-

* On aurait même pu aller plus loin en supprimant purement et simplement une unité de base et en établissant une équivalence entre une durée de une seconde et une longueur de 299 792 458 m. On aurait alors fixé la vitesse de la lumière comme un facteur numérique sans dimension, représentant une pente dans l'espace-temps à quatre dimensions. Cette pente est le demi-angle au sommet du "cône" séparant le présent du futur dans cet espace bien connu des relativistes.

ment comparée à la vitesse de la lumière, seules les caractéristiques expérimentales imposeraient une limite à l'exactitude de cette comparaison, indépendamment des incertitudes données par une horloge à césium ou a fortiori par un interféromètre.

3 — LES CONSÉQUENCES SUR LES MESURES PRATIQUES

La première conséquence d'une définition d'unité au niveau des mesures est sa matérialisation sous forme de l'étalon primaire. La notion d'étalon primaire a été déformée par la nature de certains de ces étalons comme les Prototypes Internationaux en platine du mètre et du kilogramme. Ce sont dans ce cas des objets artificiels et uniques qui sont l'étalon primaire, tous les autres étalons ne pouvant se rattacher à la définition que par une comparaison à ces objets, dont la préciosité, rehaussée par le choix d'un matériau comme le platine, a conduit à l'élaboration d'un cérémonial qui est resté attaché à la notion d'étalon primaire. Déjà avec la définition actuelle fondée sur la longueur d'onde d'un radiation du Krypton, il n'y a pas un, mais des étalons primaires répartis dans de nombreux laboratoires du monde entier.

Plus la définition est abstraite, et plus le passage à un étalon pratique est délicat. Avec la définition actuelle, une lampe à Krypton ne mérite pas l'appellation d'étalon primaire, car elle ne permet pas, à elle seule, d'observer la longueur d'onde de la radiation orangée. L'étalon primaire de longueur est pour l'instant un ensemble instrumental élaboré comprenant une lampe à Krypton 86 fonctionnant conformément aux recommandations du Comité International des Poids et Mesures, un monochromateur pour isoler la radiation étalon, et surtout un interféromètre qui est pour l'instant le moyen obligatoire pour pouvoir observer la longueur d'onde de radiations dans ce domaine de fréquences.

Avec la nouvelle définition proposée pour le mètre, on aurait envie de dire que l'étalon primaire de la longueur est la même que l'étalon primaire du temps, c'est-à-dire une horloge à césium. Si une horloge à césium doit nécessairement faire partie de l'étalon primaire de longueur (directement ou indirectement) puisqu'il faudra faire une mesure de temps (ou ce qui revient au même une mesure de fréquence) elle ne suffit manifestement pas à matérialiser la définition du mètre. L'étalon primaire de longueur, c'est de la lumière, au sens large des ondes électromagnétiques, se propageant dans le vide, et une instrumentation associée permettant de visualiser le trajet parcouru en un temps donné. De nombreux dispositifs sont susceptibles de remplir cet office. Ils vont de la roue dentée de Fizeau (ou du miroir tournant de Foucault) associée à une horloge aux techniques de mesures de temps de vol d'impulsions laser et à la visualisation par voie interférentielle de la longueur d'onde de radiations monochromatiques dont on a mesuré la fréquence.

La mesure des temps de vol aller et retour d'une impulsion laser réfléchi sur un dispositif optique adapté comme le trièdre trirectangle (ou "coin de cube") ne peut être mise en pratique que pour de grandes distances. En effet la durée des impulsions descend difficilement en-dessous de la picoseconde

(10^{-12} s) et la constante de temps de la détection est mille fois plus grande. Il est donc difficile de réduire l'incertitude à moins de quelques centimètres. C'est cette incertitude qui est atteinte dans les mesures très délicates de la distance de la Terre à la Lune effectuées à l'aide d'un laser à impulsions, d'un télescope et des rétroreflecteurs déposés sur notre satellite par diverses missions lunaires. Cette mesure sera probablement, avec les mesures de longueurs d'onde en spectrométrie atomique et moléculaire, l'une des premières à bénéficier effectivement du gain d'exactitude apporté par le nouvel étalon. En effet les mesures actuelles ne peuvent se faire, sur une distance de 400 000 km qu'avec une incertitude comprise entre 80 cm et 2 m, qui est l'incertitude apportée par la longueur d'onde dans le vide du Krypton. A condition d'apporter les corrections dues à la traversée de l'atmosphère terrestre, la nouvelle définition apportera donc un gain en exactitude de l'ordre de quelques dizaines à la mesure de la distance de la Terre à la Lune.

Pour des mesures plus terre à terre c'est d'ailleurs le problème de la propagation dans l'air qui limitera longtemps l'exactitude des mesures de longueur. Que ce soit par la mesure du déphasage de la modulation d'un faisceau, version moderne de la méthode de Fizeau et de Foucault, ou dans les mesures par interféromètre laser, c'est l'incertitude sur la valeur de l'indice de l'air qui sera prépondérante dans les meilleurs dispositifs. Dans une atmosphère bien contrôlée, on peut connaître cet indice à quelques 10^{-8} près, soit quelques dizaines de nanomètres sur un mètre, mais cela suppose des mesures délicates de la pression, de la température et de la composition chimique de l'air. En plein air, il sera difficile de faire mieux que le millionième, ce que beaucoup d'utilisateurs apprécieraient déjà sur les distances allant de quelques mètres à quelques kilomètres. Mais il s'agit

dans ce domaine d'un problème d'instrumentation plus que d'un problème de définition de l'unité.

Pour les mesures de laboratoire et la réalisation de l'étalon primaire, il sera indispensable de travailler dans le vide. Sur les distances de l'ordre du mètre c'est la visualisation interférentielle d'une longueur d'onde de laser stabilisé qui permettra de matérialiser avec la meilleure exactitude le nouveau mètre. Comme d'habitude, la définition sera accompagnée de recommandations pour sa mise en pratique. Ces recommandations préciseront quelques types de lasers stabilisés, leur fréquence, leur longueur d'onde dans le vide et l'incertitude que l'on doit en attendre (voire tableau 1). Alors qu'avec le Krypton, la précision de telles mesures était limitée par la source, c'est maintenant au niveau de la propagation de la lumière, perturbée par les phénomènes de diffraction, que se situera la limitation en exactitude des mesures interférentielles avec les lasers stabilisés.

C'est en effet la largeur spectrale, due principalement à l'élargissement thermique par effet Doppler-Fizeau, qui limitait la cohérence temporelle de la lampe à Krypton, et la longueur des trains d'onde qu'elle émet à quelques centaines de milliers de franges. Lorsque la différence de marche d'un interféromètre dépasse cette longueur, les franges d'interférence s'évanouissent par un brouillage des différentes fréquences les unes par les autres. La finesse spectrale d'un laser est pratiquement illimitée (des temps de cohérence de l'ordre de la seconde, correspondant à des trains d'onde de 300 000 km, ont été observés). La stabilité de fréquence de certains de ces lasers est parfois garantie à moyen terme à quelques 10^{-14} près, mais les mesures interférentielles sont encore loin de pouvoir profiter de cette exactitude. D'une part la mesure de la fréquence d'un laser est une opération très lourde, que seuls quelques laboratoires bien équipés en moyens de mesure de très hautes fréquences (horloges, diodes, mélangeuses, chaînes de lasers et klystrons) et seule la répétabilité à long terme de ces lasers sera exploitable pratiquement ; d'autre part de nouvelles causes d'incertitude sont apparues liées aux perturbations de la propagation de la lumière dans le vide par les phénomènes de diffraction. La définition suppose en effet que la lumière se propage en ligne droite pour que le trajet soit connu par deux points. Négligeable avec l'étalon

TABEAU 1
Liste des radiations recommandées par le C.C.D.M. (juin 1982)

Transition ν_3 P(7), composante $F_2^{(2)}$ du méthane	
$\nu = 88\ 376\ 181\ 607$ kHz	2.10^{-10}
$\lambda = 3\ 392\ 231\ 397,1$ fm	
Transition 17-1 P(62), composante o de $^{127}_{12}$	
$\nu = 520\ 206\ 808,53$ MHz	7.10^{-10}
$\lambda = 576\ 294\ 760,25$ fm	
Transition 11-5 R(127), composante i	
$\nu = 473\ 612\ 214,8$ MHz	1.10^{-9}
$\lambda = 632\ 991\ 398,1$ fm	
Transition 9-2, R(47), composante o	
$\nu = 489\ 880\ 355,1$ MHz	1.10^{-9}
$\lambda = 611\ 970\ 769,8$ fm	
Transition $2p_{10} - 5d_5$ du $^{86}_{Kr}$	
$\lambda = 605\ 780\ 210,2$ fm	4.10^{-9}

ainsi que les radiations du krypton 86, du mercure 198 et du cadmium 114, avec les valeurs recommandées par le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre au cours de sa troisième session (1963).

Dans ce tableau les fréquences sont la moyenne des meilleures mesures disponibles, et les incertitudes représentent trois fois l'écart-type estimé sur la moyenne. Les longueurs d'onde sont calculées à partir de ces fréquences selon la relation $\lambda = c/\nu$ et sont arrondies.

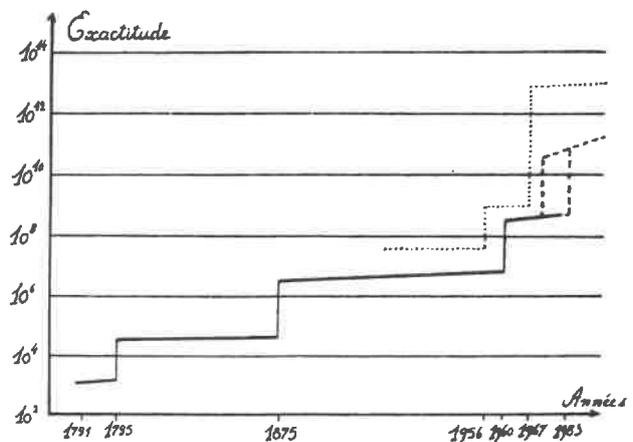


Fig. 4 : L'évolution de l'exactitude $E/\delta E$ au niveau de l'étalon primaire pour le mètre (trait plein) et pour la seconde (trait pointillé) depuis deux siècles.

actuel, ce phénomène prend d'autant plus d'importance que la longueur d'onde est grande, ce qui défavorise le laser stabilisé sur le méthane par rapport à ses concurrents stabilisés dans le domaine visible sur des raies de l'iode, bien que la stabilité et la reproductibilité en fréquence de ces derniers soient moins bonnes. Ce serait déjà un bien beau résultat que de gagner un facteur 100 dans l'exactitude au niveau de l'étalon primaire. La nouvelle définition ouvre la voie vers une amélioration des interféromètres qui permettront peut-être au mètre de se rapprocher de la seconde dans l'échelle des exactitudes.

D'un point de vue pratique, il n'y aura pas de grands changements dans les laboratoires de métrologie des longueurs. Il y a déjà longtemps que ceux-ci sont équipés de lasers stabilisés à titre d'étalons secondaires. Ces lasers offrant une meilleure visibilité des franges d'interférence aux grandes différences de marche, étaient même souvent utilisés de préférence au Krypton, des valeurs de longueurs d'onde ayant été recommandées pour certains de ces lasers. Alors que ces longueurs d'onde étaient précédemment estimées par comparaison avec celle du Krypton, celles-ci sont maintenant calculées à partir de la fréquence de ces lasers mesurée avec une meilleure précision. Pour les radiations visibles, le meilleur raccordement en fréquence est d'ailleurs pour l'instant une comparaison interférométrique de longueurs d'onde avec le laser stabilisé sur le méthane, lui-même raccordé à l'horloge à césium par hétérodynages successifs. Nous voyons donc que même au niveau de la pratique expérimentale, la nouvelle définition n'apportera pas de grands bouleversements dans les laboratoires. De ce point de vue, ce changement de définition sera beaucoup moins traumatisant que celui de 1960. Les physiciens espèrent qu'il apportera un gain en exactitude du même ordre de grandeur, soit à peu près 100, mais surtout que cette définition, indépendante d'un montage expérimental particulier, aura une durée de vie beaucoup plus longue que les précédentes, malgré la rapidité croissante des progrès observés aussi bien en recherche fondamentale que dans les techniques expérimentales.

4 – CONCLUSION

L'avènement de la nouvelle définition du mètre sera certainement une étape importante dans l'histoire de la Métrologie et de la Physique. Par rapport à la définition fondée sur la radiation du Krypton, elle représente un progrès au moins aussi important que celui que cette dernière a apporté par rapport au Prototype International. Ceci est moins vrai au niveau des gains en exactitude qu'à celui de la nature de l'étalon. On est passé en 1960 d'un étalon matériel artificiel, unique et périssable à un étalon atomique naturel, universel et, si l'on peut dire, inusable, mais lié à une réalisation expérimentale particulière. La nouvelle définition est au moins aussi universelle que la précédente, mais, beaucoup plus fondamentale, elle s'adaptera sans changement aux progrès inévitables de la science et de la technique.

Comme tout changement, celui-ci a ses détracteurs. Une objection pourrait être faite dans le cadre de la théorie de la relativité générale qui prévoit un ralentissement des ondes électromagnétiques au voisinage

d'une masse importante. Cette conséquence de la théorie d'Einstein a été vérifiée expérimentalement lors des éclipses totales de Soleil par la courbure des rayons lumineux qui sont passés à proximité de notre astre. N'est-il pas contraire à la nature de fixer pour c une valeur immuable ? La nouvelle définition impliquera simplement une contraction du mètre dans de telles conditions, et cette interprétation n'est pas plus illogique que de dire que la lumière "va moins vite" dans un champ gravitationnel. D'un point de vue pratique ces effets sont d'ailleurs pour longtemps hors de la portée de nos mesures de longueur, et il y avait certainement des phénomènes semblables avec un étalon matériel : qui pourrait dire ce que devient une maille cristalline dans un champ gravitationnel, indépendamment de tout problème de déformation élastique ? Qu'advient-il de notre mètre en platine, avant d'être réduit en bouillie nucléaire, s'il tombait dans la zone d'accrétion d'un trou noir ? La théorie de la relativité restreinte au contraire, qui postule que les lois de la physique sont identiques pour tous les systèmes inertiels (ou galiléens), justifie le choix qui vient d'être fait. Il aurait été beaucoup plus difficile, d'un point de vue théorique, d'accepter ce principe de définition du mètre avant que soient connus les résultats des expériences de MICHELSON et MORLEY.

La mesure des temps a toujours été la plus performante. Aussi bien avec l'étalon terrestre qu'avec les horloges mécaniques dans le passé, et qu'avec les horloges atomiques modernes, les plus grandes exactitudes ont toujours été obtenues dans la mesure des temps et des fréquences. Quand un phénomène physique permet de relier une grandeur au temps, c'est une possibilité pour cette grandeur de profiter d'une instrumentation très performante, comme l'a montré l'apparition de nombreux instruments numériques. Ce n'est pas d'aujourd'hui que les métrologues ont été tentés de raccorder les longueurs aux temps : pour la première définition du mètre, on avait pensé à une alternative au méridien terrestre qui est la longueur d'un pendule battant la seconde. Mais la relation

$$L = 4\pi^2 T^2 g$$

entre les deux grandeurs comportait l'accélération de la pesanteur g qui est soumise à des fluctuations géographiques.

La relation

$$L = c.T$$

bien que nécessitant une instrumentation plus élaborée, offre une meilleure garantie d'universalité et de pérennité.

Cet article est publié avec l'aimable autorisation de la rédaction du bulletin d'information du Bureau National de Métrologie.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) TRYSTRAM F : "Le Procès des Étoiles", Ed Seghers, 1980.
- (2) DELAMBRE et MÉCHAIN : Base du système métrique décimal, Paris, 1806-1810.
- (3) MICHELSON A.-A., BENOIT J.-R. : Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures, XI, 1894.
- (4) FABRY C., BENOIT J.-R., PEROT A : Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures, XV, 1913.
- (5) FABRY C : "Les applications des interférences lumineuses", Editions de la Revue d'Optique théorique et appliquée, 1923.
- (6) CONNES P : "Les lasers", 3^e session du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre, Gauthier-Villars, 1962.
- (7) BARGER R.-L., HALL J.-L. : Phys. Rev. Lett., 22, 4, 1969.
- (8) EVENSON K.-M., BARGER R.-L., HALL J.-L. : Phys. Rev. Lett., 29, 1346, 1972.
- (9) TERRIEN J. : Nouv. Rev. Optique, 4, 4, 1973.
- (10) BRILLET A., HALL J.-L. : Phys. Rev. Lett., 42, 9, 1979.
- (11) BOUCHAREINE P. : Bulletin d'information du Bureau National de Métrologie, n° 43, 1981 et la "Recherche", n° 91, 1978.

