

" Le mètre est mort, vive la lumière "

par C. RUHLA,

Université Claude-Bernard (Lyon I),

43, rue du 11-Novembre-1918, 69621 Villeurbanne.

La métrologie des grandeurs physiques est une opération délicate et qui demande des qualités d'expérimentateur exceptionnelles. Peu de physiciens ont le courage de s'engager dans cette voie dont le moins qu'on puisse dire est qu'elle est couverte de chausse-trapes. Heureusement, il en existe quand même quelques-uns, et ils constituent une race particulière, celle des physiciens métrologistes. Ce sont des maniaques dans le meilleur sens du terme, c'est-à-dire des expérimentateurs ayant élevé leur méthode à la hauteur d'une institution. Cet article est un hommage à leur travail à l'occasion d'une révolution en préparation car l'année 1983 verra apparaître une nouvelle définition du mètre, relégué au rang d'unité dérivée, et remplacé par une nouvelle unité fondamentale, la vitesse de la lumière dans le vide. Cette date importante sera pour nous l'occasion d'élargir le débat et de réfléchir aux notions de longueur et de temps, à la manière dont on les a définies et mesurées au cours des âges, jusqu'à la date fatidique de 1983 qui va bouleverser quelque peu nos habitudes, en particulier dans le domaine de la pédagogie.

LA PHYSIQUE A BESOIN DE BASES SOLIDES.

Science quantitative par excellence, même si l'on n'ose pas tout à fait l'appeler science exacte, la physique est caractérisée par un grand nombre de lois exprimant des relations mathématiques entre des grandeurs. Naturellement, la découverte et la vérification de ces lois doit reposer sur un système de mesures précises de ses grandeurs. Il est donc nécessaire de disposer pour chacune d'entre elles d'un étalon de qualité, condition de la précision des mesures ultérieures.

De plus, on constate fréquemment que des mesures précises mettent en évidence de petits écarts entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux. Ces effets secondaires peuvent être qualifiés d'importants dans la mesure où ils

(1) Conférence présentée à l'Université de Lyon, à l'occasion de l'ouverture de la 10^e année de formation permanente, le 20 octobre 1982.

conduisent souvent à de nouvelles découvertes. Nous en citerons deux exemples, très caractéristiques :

- La découverte des gaz rares par RAMSAY à partir de 1892 après l'observation d'une différence de masse volumique significative entre l'azote préparée par les chimistes et l'azote extrait de l'air atmosphérique.
- La découverte de la planète Neptune par LEVERRIER en 1846 après l'observation d'écarts irréductibles entre les prévisions des éphémérides sur le mouvement de la planète Uranus et les positions effectivement observées, dans le ciel, pour cette planète. LEVERRIER attribua ces écarts aux perturbations créées par une planète inconnue, baptisée Neptune, et dont il calcula les caractéristiques et la position apparente dans le ciel. Ces prévisions permirent l'observation effective de la planète Neptune par l'astronome allemand GALLÉ à l'observatoire de Berlin.

UN ETALON DE QUALITE.

Essayons d'abord de cerner les qualités qu'un bon métrologue va exiger d'un étalon. Il faut en citer quatre :

- Une définition correcte de la grandeur à mesurer, ce qui suppose une réflexion approfondie sur d'éventuelles ambiguïtés cachées.
- Un étalon à caractère universel pouvant être reproduit correctement en cas de destruction accidentelle.
- Une stabilité propre de l'étalon aussi bien pour les variations à court terme que pour les variations à long terme.
- Une reproductibilité commode permettant à chaque pays de pouvoir disposer d'un ou plusieurs exemplaires de l'étalon pour la grandeur à mesurer.

Il est bien évident qu'il n'existe pas d'étalon idéal et que l'étalon choisi résultera d'un compromis entre les quatre impératifs qui viennent d'être mentionnés. La qualité obtenue sera caractérisée par une incertitude globale regroupant les écarts de stabilité et de reproductibilité. On définit encore, ce qui est bien mieux, l'incertitude relative :

$$\text{Incertainitude relative} = \frac{\text{incertainitude globale}}{\text{valeur de l'étalon}}$$

On peut arriver ainsi à une performance de 10^{-13} pour l'incertitude relative sur la mesure du temps.

On utilise également la précision pour caractériser les qualités d'un étalon. C'est l'inverse de l'incertitude relative, et elle sera donc égale à 10^{13} dans le cas de la mesure du temps.

Enfin, on dit parfois, à tort, une précision de 10^{-13} , ce qui est incorrect mais sans ambiguïté, car le terme 10^{-13} ne peut pas être confondu avec le terme 10^{13} .

Nous allons essayer de dégager maintenant comment l'on a pu définir les notions de longueur et de temps et les étalons correspondants dans la période précédant le système métrique.

LA PREHISTOIRE DES LONGUEURS.

La notion de distance — donc de longueur, qui est la mesure de la distance — n'est pas facile à définir. Il est incorrect de dire que la distance est une caractéristique de l'espace car on peut retourner la proposition et dire que l'espace est l'ensemble des distances. Comme pour beaucoup de grandeurs physiques macroscopiques, il faut chercher l'origine de cette notion dans une sensation physiologique. La notion de distance commence au berceau lorsque le jeune bébé cherche à entrer en contact avec les objets qui l'entourent et qui sont à sa portée. Son étalon est, à ce moment-là, la longueur de son bras. Cette éducation réflexe se perfectionne avec la maîtrise progressive de la vue qui, avec la vision stéréoscopique, donne la sensation du relief. Un peu plus tard, son univers s'élargit aux dimensions de la cour de l'école et son unité de longueur est la distance parcourue en un pas ; c'est pourquoi la cour lui paraît immense. Au contraire, l'adulte qui vient faire un pèlerinage aux sources dans son ancienne école primaire trouvera cette cour très petite car il se réfère intuitivement à une unité qui est la longueur de son pas d'adulte et non plus celle de son pas d'enfant. La sensation physiologique de distance définit donc une de nos relations avec les objets extérieurs et c'est en cela que se situe l'origine de la notion de longueur.

C'est ensuite le rôle du physicien de définir une méthode opérationnelle précise qui va permettre de mesurer les longueurs tout en restant fidèle à la sensation physiologique qui est à l'origine de la notion.

Pour mesurer une longueur, on choisit d'abord un étalon arbitraire sous la forme d'une règle rigide et droite d'extrémités A et B (fig. 1).

- Si l'on peut amener simultanément A et B en coïncidence avec A' et B', on dira que la longueur A'B' est égale à AB.
- Si maintenant, faisant glisser la règle AB en ligne droite dans la direction de son arête, on peut mettre en coïncidence simultanément les points B et C', d'une part, A et B' d'autre part, on dira que la longueur A'C' est égale à 2 fois la longueur AB.

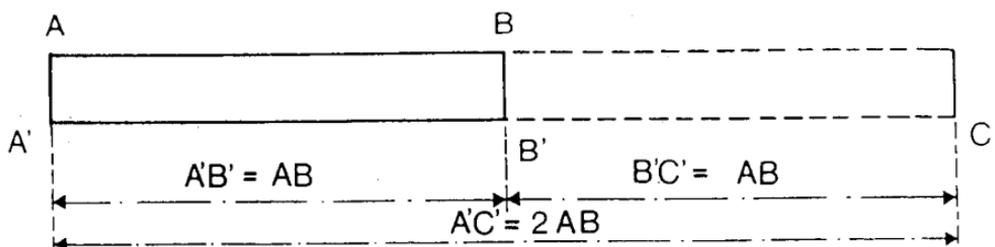


Fig. 1. — La définition opérationnelle d'une mesure de longueur.

Ces deux opérations permettent de définir l'égalité et le rapport de deux longueurs : nous venons donc de définir une grandeur mesurable.

Deux hypothèses implicites subsistent dans cette définition de la longueur et comme elles ne sont que très rarement évoquées, il est important de les souligner ici :

- La notion de règle rigide nous amène à la notion de corps solide et l'on ne peut pas dire que le solide soit caractérisé par la constance des distances entre ses différents points sans que la définition ne se boucle sur elle-même. Là encore, la sensation physiologique nous conduit vers la notion de corps plus dur ou plus mou, plus élastique ou moins élastique et nous permet d'imaginer des conditions expérimentales pour lesquelles la règle « rigide » ne sera pas déformée de façon appréciable.
- La notion de ligne droite n'est pas non plus évidente *a priori* ; en fait, on choisit sans toujours le dire une ligne droite définie par un rayon lumineux, aussi bien dans la construction de l'étalon de longueur que dans les opérations d'arpentage ou de triangulation. Le rayon lumineux n'étant qu'une fiction mathématique, on ne pourra s'en approcher qu'en veillant à minimiser tous les phénomènes de diffraction. D'autre part, si l'on peut évacuer la difficulté à l'échelle terrestre, n'oublions pas qu'à l'échelle astronomique un rayon lumineux peut être « courbe » lorsqu'il passe près d'une masse gravitationnelle importante, ce qui nous amène à nous interroger à ce moment-là sur notre définition de la ligne droite. En tout état de cause, il était opportun de rappeler que lorsqu'on affirme que la lumière se propage en ligne droite, il ne s'agit pas d'une propriété mais d'une définition.

Il ne reste plus qu'à choisir un étalon de longueur *a priori* arbitraire, en fonction des critères de commodité et d'universalité que nous avons précédemment indiqués. Sans remonter jusqu'au déluge, voyons ce qui se passait au Moyen Age.

Le pied de Charlemagne était d'une dimension démesurée, ce qui ne doit pas nous surprendre puisqu'il était le fils de Berthe aux grands pieds. Dimension impériale s'il en fût, puisqu'il avait une longueur correspondant à 325 de nos millimètres actuels alors que le pied anglo-saxon n'atteignait que 305 millimètres. Pour ce qui est de l'universalité, ce pied couvrait de son prestige tout le Saint Empire romain-germanique, donc une population importante, sinon universelle. C'est avec la longueur de ce pied que la France a vécu jusqu'à la Révolution, c'est-à-dire pendant un millénaire avec, bien entendu, des multiples et des sous-multiples, dans un système sexagésimal ou duodécimal assez incommode car, à l'époque, la plupart des Français ne savaient compter que sur leurs dix doigts :

- 1 toise = 6 pieds (1 949 millimètres actuels),
- 1 pied = (325 millimètres actuels),
- 12 pouces = 1 pied,
- 12 lignes = 1 pouce,
- 12 points = 1 ligne.

Plus grave est le fait que sous le même nom, dans les provinces françaises, on utilisait des unités de longueur de valeur différente, et cet inconvénient ne sera levé qu'avec l'adoption du système métrique.

LA PREHISTOIRE DES TEMPS.

La notion de temps est encore plus délicate à définir que la notion de longueur. Un des meilleurs spécialistes français de la mesure des temps, Jacques RUTMAN, faisait remarquer avec beaucoup d'humour que si l'on ne sait pas très bien ce qu'est le temps, on est certain par contre de pouvoir le mesurer avec une très grande précision. Là encore, nous allons chercher à situer ce que nous apportent les sensations physiologiques ou les observations élémentaires.

La notion de durée est d'abord une sensation, celle que l'on éprouve pendant une attente trop grande ou un cours qui s'étire en longueur ; sensation d'ennui pouvant même aller jusqu'à des baillements pour ne pas dire plus. De cette sensation va naître la notion de durée qui correspond à un intervalle de temps. C'est une grandeur mesurable car on peut définir l'égalité et le rapport de deux durées.

La notion de date a aussi pour origine une sensation. De même que la sensation de chaud et de froid peut nous conduire à la notion d'échelle de température, de même la notion de vieux et de jeune peut nous conduire à la notion de date, donc d'échelle de temps. Mais, au-delà des sensations élémentaires,

l'observation des êtres vivants nous permet de préciser davantage. Si l'on observe les arbres d'une forêt (fig. 2), nous pouvons

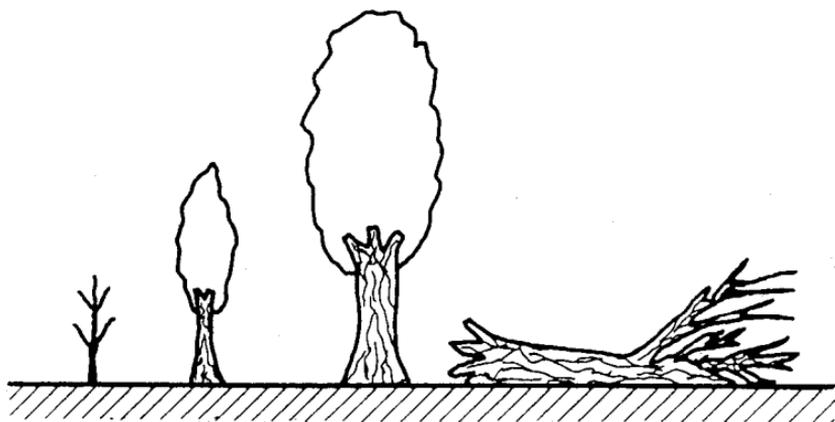


Fig. 2. — L'observation des arbres d'une forêt suggère l'existence d'une relation d'ordre.

les classer par exemple en quatre catégories : les petits, les moyens, les grands et enfin ceux qui sont tombés. Entre ces quatre catégories, on peut définir une relation d'ordre au sens que lui donnent les mathématiciens et nous n'avons pas le droit de faire une commutation à l'intérieur de cette relation car elle serait contraire à la réalité. Tous les êtres vivants donnent lieu à une relation d'ordre qui constitue une expression élémentaire de la date, donc de l'échelle de temps.

On peut définir l'égalité de deux dates mais par leur rapport ; la date n'est pas une grandeur mesurable, mais seulement repérable.

La notion de temps a donc deux aspects : la durée et la date, la première étant mesurable, la deuxième étant seulement repérable et ce sera le rôle du physicien de définir des méthodes opérationnelles pour déterminer l'une et l'autre en comparant nos sensations physiologiques imprécises et infidèles à des phénomènes physiques bien définis et bien reproductibles. Ces phénomènes sont de deux ordres :

- L'observation des mouvements célestes, c'est-à-dire l'apport de l'astronomie à la détermination du temps.
- L'observation de systèmes mécaniques ayant des mouvements répétitifs, ce qui nous conduit à l'histoire de l'horlogerie.

Un dernier problème reste posé et nous ne faisons que l'évoquer ici : le temps physique des objets célestes ou des horloges

est-il bien le même que le temps biologique qui est à l'origine de notre notion de temps. Le débat est ouvert depuis les débuts de la polémique sur l'interprétation de l'âge du voyageur de LANGEVIN et l'on ne peut pas dire qu'elle soit définitivement close. PRIGOGINE a écrit des choses fort intéressantes à ce sujet dans un ouvrage intitulé « Physique, temps et devenir » et nous y renvoyons le lecteur.

Les observations astronomiques vont permettre dès le Moyen Âge une bonne définition des dates et des durées. Il s'agit en effet de définir un temps qui respecte deux rythmes biologiques fondamentaux : la succession des jours et des nuits, et la succession des saisons.

L'unité de durée est la seconde définie comme la fraction $1/86\,400^e$ du jour solaire moyen. Elle correspond approximativement à la durée d'un battement de cœur et ceci n'est sans doute pas un hasard. Le rythme biologique fondamental est le jour solaire qui est la durée séparant deux passages successifs du soleil au zénith d'un lieu donné. Ce jour solaire vrai varie au cours de l'année en raison de l'ellipticité de l'orbite terrestre autour du soleil. Les variations extrêmes sont + 14 minutes et - 16 minutes. On a donc défini un jour solaire moyen pas trop différent du jour solaire vrai mais beaucoup plus constant et c'est la fraction $1/86\,400^e$ de ce jour solaire moyen qui définit l'unité de durée.

L'échelle des dates est le calendrier, repérage conventionnel des jours et des années, choisi de manière à rester en accord avec le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil. Depuis 1582, sous l'impulsion du Pape GRÉGOIRE XIII, le monde occidental, puis le monde entier (2), ont adopté le calendrier grégorien, qui repose sur les trois principes suivants :

- L'année comporte 365 jours.
- Les années multiples de 4 sont bissextiles (366 jours).
- Les années centenaires ne sont pas bissextiles sauf une tous les 400 ans. En clair, ceci veut dire que les années 1700, 1800 et 1900 n'étaient pas bissextiles, mais que l'an 2000 le sera.

Ce calendrier, adopté après des approximations successives (calendrier vague de l'ancienne Égypte, calendrier julien de Jules César...) convient assez bien pour définir l'échelle des dates puisqu'il répond à l'objectif fondamental : le mois de juillet est

(2) Certains pays, tout en adoptant le calendrier grégorien pour les liaisons internationales, ont conservé par ailleurs leur calendrier traditionnel (calendrier islamique, calendrier hébraïque, calendrier vietnamien..., etc.).

toujours un mois d'été et le mois de janvier toujours un mois d'hiver, pour les habitants de l'hémisphère nord.

Le décalage qui subsiste dans le calendrier grégorien est de 26 secondes par an, soit un jour tous les 3 300 ans. C'est donc seulement vers l'an 4880 que le calendrier grégorien sera décalé d'un jour, et il faudra faire alors un réajustement sur le mois de février le plus proche.

L'histoire de l'horlogerie commence avec les clepsydes de l'ancienne Egypte. Ce sont des récipients remplis d'eau. Cette eau s'écoule par un orifice inférieur et des graduations sur la paroi permettent le repérage des heures (fig. 3).

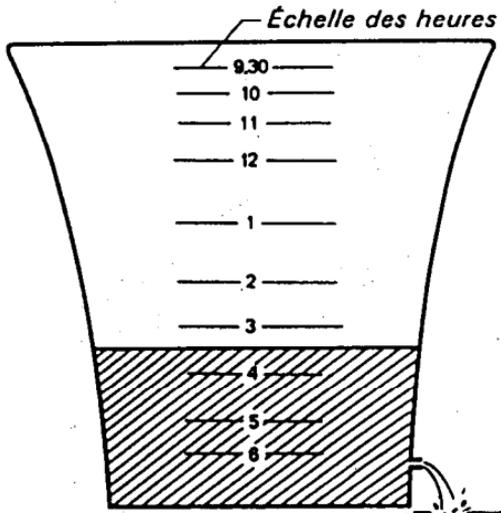


Fig. 3. — La clepsydre est l'ancêtre de l'horloge.

Avec le Moyen Age vont se développer dans les églises et les monastères des horloges dont le mouvement mécanique est animé par des poids et dont la régulation est assurée par des ailettes. Ces horloges sont peu précises et peu fidèles et sont réajustées en permanence sur le mouvement du soleil.

Au XVII^e siècle, GALILÉE se sert encore d'une clepsydre pour mesurer des intervalles de temps courts lorsqu'il étudie expérimentalement le mouvement d'une bille sur un plan incliné. Par contre, c'est ce même GALILÉE qui va découvrir en 1583 l'isochronisme des petites oscillations en observant le mouvement d'une lanterne suspendue au plafond de la cathédrale de Pise. Après GALILÉE, HUYGENS en 1657 invente le balancier à échappement qui lui permet d'entretenir les oscillations d'un pendule

et donc de construire la première horloge. Les horloges mécaniques vont se développer pendant le XVII^e et le XVIII^e siècle mais elles continueront à poser un problème pour les navigateurs, leur fidélité étant insuffisante pour une détermination précise de la longitude. Cette difficulté sera levée par l'observation des éclipses des satellites de Jupiter dont les éphémérides seront établis par l'astronome français BAILLY.

Nous arrivons ainsi, cahin-caha, à l'aube de la Révolution Française qui va faire progresser considérablement la métrologie en instituant le système métrique.

LES PERES FONDATEURS.

À l'aube de la Révolution de 1789, on peut considérer que l'on dispose déjà, grâce à l'astronomie, d'une définition et d'une mesure correcte du temps, et qui a de plus l'avantage d'être admise par tous en Occident. Par contre, une diversité anarchique règne dans le domaine des étalons de longueur et les hommes de l'époque, à la recherche de solutions universelles dans tous les domaines, envisagent tout naturellement une réforme simplificatrice des systèmes d'unités. L'étalon de longueur recherché devrait avoir une valeur de l'ordre d'une demi-toise, pour avoir un caractère naturel et universel en fonction de deux idées directrices :

- La première, due en particulier à HUYGENS et à LA CONDAMINE, est de choisir comme unité de longueur celle d'un pendule simple qui bat la seconde. (Cette longueur donnée par la relation $l = gT^2/4\pi^2$ donne avec le mètre actuel $l = 0,994$ mètre).
- La deuxième, qui a la faveur des astronomes et des navigateurs, est de choisir comme étalon de longueur la dix millionième partie de la distance pôle-équateur, c'est-à-dire le quart du méridien terrestre. Cette définition ouvre en même temps la porte à une division en système décimal pour définir avec des grades les latitudes et les longitudes (3).

C'est la deuxième idée qui va l'emporter, en particulier sous l'impulsion de TALLEYRAND ; l'Assemblée Constituante va charger deux astronomes, DELAMBRE et MÉCHAIN, de mesurer un arc de méridien de façon à déterminer les dimensions précises d'un étalon commodément réalisable et utilisable, et cet étalon devra par ailleurs correspondre à la définition souhaitée par les astronomes et les navigateurs.

(3) Cette idée a été émise pour la première fois en 1670, par un Lyonnais, astronome et mathématicien, l'abbé Gabriel Mouton.

DELABRE et MÉCHAIN sont donc les Pères fondateurs du système métrique et ils vont mesurer de 1792 à 1799 l'arc de méridien qui va de Dunkerque à Barcelone, ce qui représente une différence de latitude d'environ 10°. La méthode utilisée est la triangulation (fig. 4), à partir d'une base mesurée en toise, et en 1799 ils pourront déclarer que l'unité cherchée correspond à 0,5 130 740 toise.

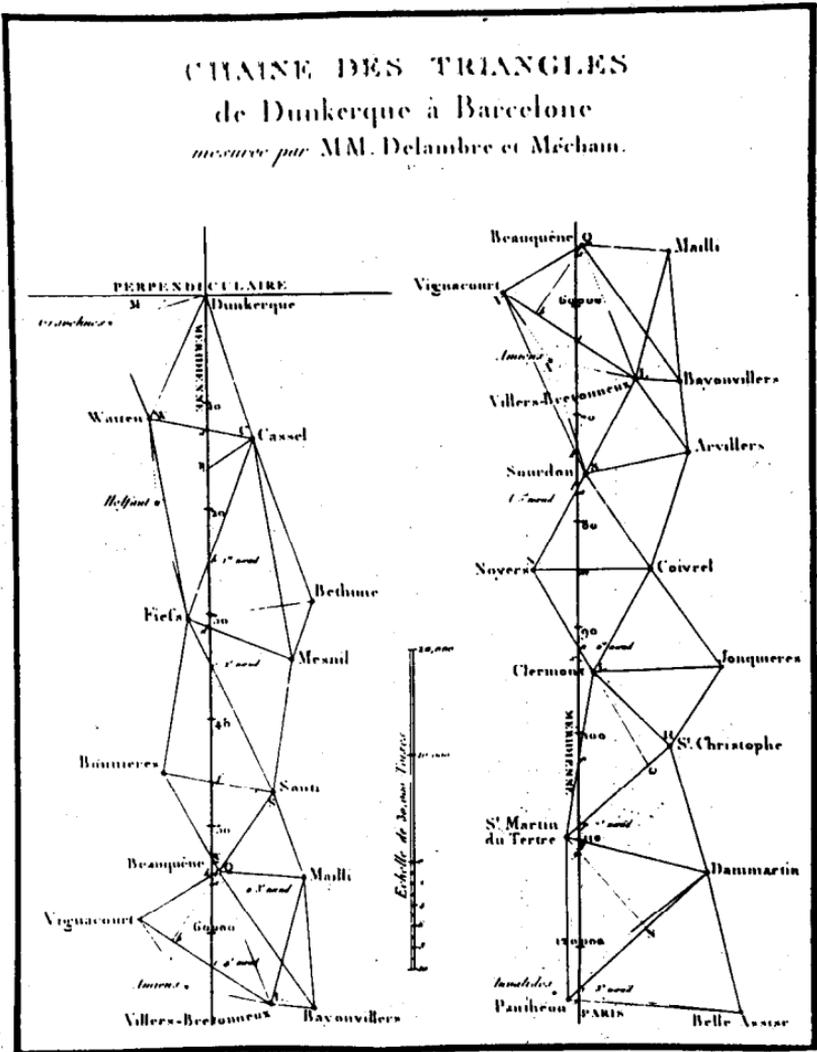


Fig. 4. — La triangulation de Delambre et Méchain.

Sur les indications de DELAMBRE et MÉCHAIN, JANNETTI forge une règle en platine correspondant donc à 0,5 130 740 toise et cette règle est déposée aux Archives Nationales.

LA PREMIÈRE DÉFINITION LÉGALE DU MÈTRE est adoptée en 1801 sous la forme suivante : « *Le mètre est la dix millionième partie de la distance du Pôle à l'Equateur* ».

La loi prévoyait une période transitoire laissant une place provisoire aux anciennes unités comme la toise et l'aune, et c'est finalement en 1840 que le système métrique devint absolument obligatoire en France.

On dispose donc enfin à cette date d'un système d'unité simple, logique, et c'est sur cette base que la physique classique va donner sa pleine mesure.

L'AGE D'OR DU CLASSICISME.

La période classique va commencer par une catastrophe lorsque de nouvelles mesures du méridien font apparaître que le mètre JANNETTI est beaucoup plus précis qu'exact. En effet :

- On peut reproduire la règle de JANNETTI avec une incertitude relative maximum de 10^{-7} .
- Par contre, la règle de JANNETTI est trop courte de 0,3 millimètre par rapport à la définition universelle, correspondant au méridien terrestre, ce qui représente un écart de $3 \cdot 10^{-4}$ en valeur relative. La mise en évidence de cet écart est due à l'amélioration des mesures de méridien qui ont beaucoup progressé au début du XIX^e siècle quand on a su en particulier déterminer de façon précise l'aplatissement de la Terre.

Un débat douloureux va s'instituer pour savoir si l'on doit abandonner le mètre de JANNETTI et en réaliser un nouveau plus proche de la définition de DELAMBRE et MÉCHAIN, ou bien si, au contraire, on abandonne une définition astronomique à caractère universel pour conserver une définition pratique, celle de l'étalon des Archives Nationales.

En fait, on ne dispose plus de la liberté du choix, comme en 1799. Entre temps, la société industrielle s'est développée avec, en particulier, la construction d'un grand nombre d'appareils de précision sur la base de la longueur du mètre de JANNETTI. On ne peut donc pas revenir en arrière sans changer tous les appareils, ce qui est difficilement acceptable. C'est ce que constatera la première Conférence Internationale de Poids et Mesures réunie à Paris en 1875 et elle va proposer l'abandon de la définition de DELAMBRE et MÉCHAIN.

LA DEUXIÈME DÉFINITION DU MÈTRE qui date de 1875 s'énonce donc ainsi : « *Le mètre est la longueur, dans les conditions normales (0° C, 760 mmHg), d'un étalon de platine irridié déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres* ». L'alliage iridium-platine (90 % Pt, 10 % Ir) a été choisi parce qu'il est plus rigide que le platine pur. D'autre part, les traits sur la règle sont plus réguliers donc mieux définis que ceux du mètre de JANNETTI. L'étalon de platine irridié est donc une copie améliorée du mètre des Archives Nationales et c'est sur la base de cet étalon défini avec une incertitude relative de 10^{-7} que la Physique va vivre pendant 85 ans.

La mesure des longueurs ne va pas être la seule à profiter des progrès de la science et de la technique. Par le travail patient des astronomes, la mesure des temps va faire des progrès considérables. C'est ainsi que, par étapes successives, ils vont nous proposer d'abord le temps universel (incertitude relative 10^{-7}) puis, ensuite, le temps des éphémérides (incertitude relative 10^{-9}).

LE TEMPS UNIVERSEL.

La rotation de la Terre définit notre rythme de vie diurne et nocturne, et elle va déterminer nécessairement le meilleur temps adapté à ce rythme, que l'on appellera le temps universel. Ce temps est toujours utilisé actuellement et il est donné par l'horloge parlante. Le rôle des astronomes sera donc de contrôler les indications de l'horloge parlante par l'observation du mouvement diurne de la sphère céleste. En effet, si l'on veut déterminer le jour solaire, il faut repérer deux passages successifs du soleil au méridien, et cela correspond à des conditions d'observation assez inconfortables. On préfère donc, parce que c'est à la fois plus facile et plus précis, observer deux passages successifs d'une étoile au méridien, ce qui correspond au jour sidéral. Ces mesures se font en utilisant une lunette méridienne (fig. 5), lunette mobile seulement autour d'un axe perpendiculaire au plan du méridien local et qui permet en même temps de mesurer la déclinaison d'une étoile. On passe ensuite du jour sidéral au jour solaire moyen en rajoutant 3 min 56, 909 s (4). On obtient ainsi un temps très bien adapté à notre vie quotidienne, avec une incertitude relative de 10^{-7} , c'est-à-dire une erreur maximum de une seconde tous les trois mois.

Il faut se demander ensuite si la Terre est une bonne horloge, c'est-à-dire si le temps universel ainsi déterminé ne présente pas des irrégularités ou des dérives. En fait, la Terre n'est pas une bonne horloge lorsqu'on atteint ce degré de précision et elle présente effectivement ces deux défauts.

(4) Il s'agit de minute et de seconde de jour solaire moyen.

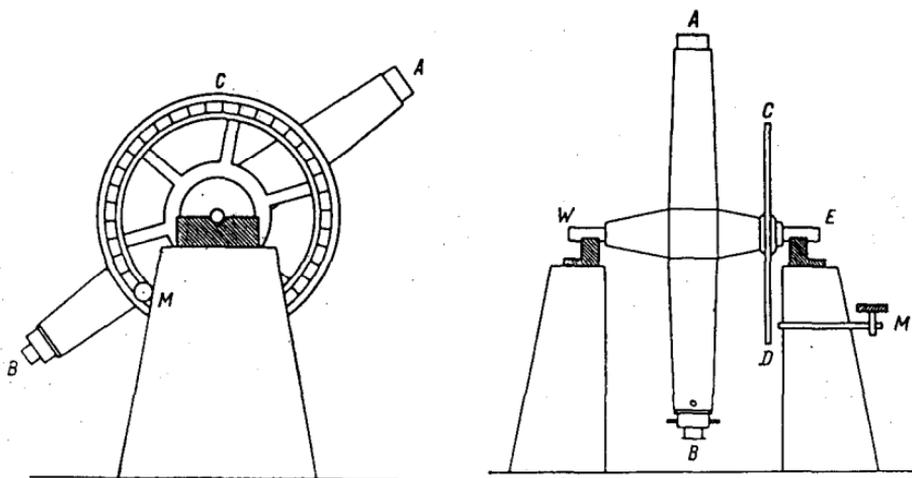


Fig. 5. — Une lunette méridienne.

Les irrégularités dans la rotation ont pour origine des déplacements assez rapides de grandes masses atmosphériques ou magnétiques. Ces déplacements font varier le moment d'inertie de la Terre, et comme, par ailleurs, le moment cinétique reste constant, cela entraîne une variation de la vitesse angulaire de rotation. Il n'est pas très rare d'observer en une nuit une variation du jour sidéral de l'ordre d'une seconde, qui correspond à ce type d'irrégularité.

De telles irrégularités sont gênantes mais on pourrait espérer s'en affranchir dans la mesure où elles sont aléatoires c'est-à-dire aussi bien positives que négatives. Mais il existe aussi une dérive lente et systématique beaucoup plus grave. Elle a pour origine le phénomène des marées provoqué par les attractions combinées de la lune et du soleil sur les océans terrestres (fig. 6).

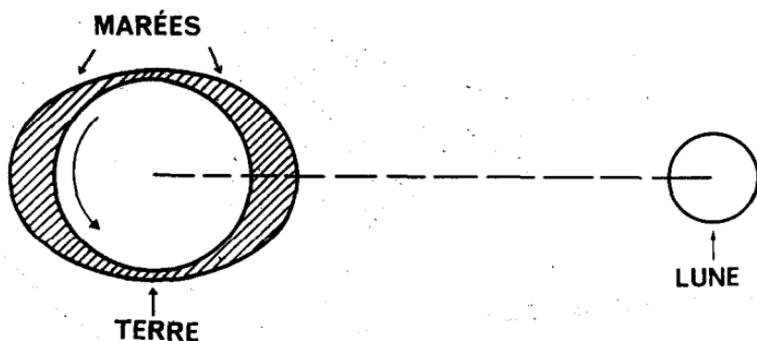


Fig. 6. — Les marées ralentissent la rotation de la Terre.

Il existe donc deux bourrelets océaniques, l'un dirigé vers la lune, l'autre dans la direction opposée, et la Terre tourne à l'intérieur de ces deux bourrelets qui agissent comme des patins de frein. La Terre se ralentit donc lentement au rythme de 0,6 seconde par an et il s'agit bien là d'une dérive systématique.

Ce résultat a été mis en évidence après une longue et minutieuse étude du mouvement des planètes, qui faisait apparaître un décalage systématique par rapport au temps universel alors que, par ailleurs, les mouvements des planètes étaient parfaitement cohérents entre eux. En clair, ceci veut dire que la Terre paraît avancer dans son mouvement de révolution autour du Soleil et il en est de même pour les autres planètes. Il faut donc déterminer, même si cela est assez compliqué, un temps qui rende mieux compte des mouvements planétaires et on l'appellera le temps des éphémérides.

Le temps des éphémérides est défini à partir de l'année tropique, qui est l'intervalle de temps séparant deux équinoxes de printemps. De façon plus précise, l'année tropique est l'intervalle de temps compris entre deux passages successifs du centre du Soleil au point γ (point vernal) (5). Le point γ est donné sur la sphère céleste par la direction de l'intersection des plans de l'équateur et de l'écliptique (fig. 7).

L'année tropique 1900 va servir de repère pour la détermination des durées et des dates, et la Conférence Internationale des Poids et Mesures va adopter la définition suivante :

« La seconde est la fraction $1/31\,556\,925,9747$ de l'année tropique 1900 à 12 h, le 1^{er} janvier ».

On définit ainsi un étalon de durée, la seconde, avec une incertitude relative de 10^{-9} , ce qui correspond à une erreur maximum d'une seconde pour 25 ans. Quant à la date, elle sera donnée par l'année tropique en prenant comme année de départ l'année 1900.

Ce temps des éphémérides que nous venons de définir ne convient pas parfaitement pour régler nos rythmes de vie diurne et nocturne. Mais il convient très bien aux mouvements planétaires et il est donc certainement beaucoup plus proche de la notion de temps que nous cherchons à définir avec le maximum de précision.

(5) On remarquera que l'année tropique ne correspond pas exactement à l'année sidérale qui est la période de révolution terrestre repérée par rapport aux étoiles fixes, car le point vernal se déplace sur l'écliptique en raison de la précession des équinoxes.

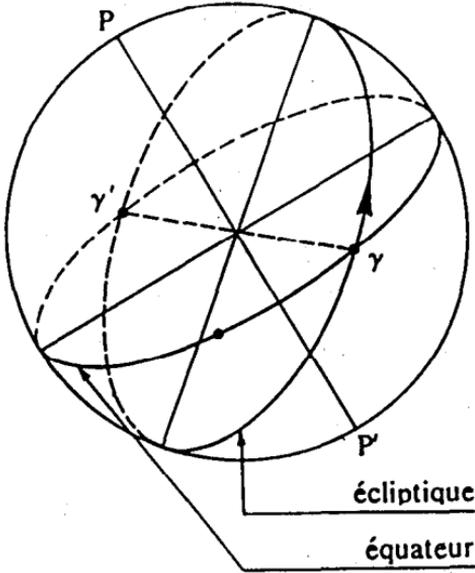


Fig. 7. — Définition du point vernal (équinoxe de printemps).

La vitesse de la lumière pendant cette période du classicisme va être mesurée essentiellement par temps de vol en utilisant la relation :

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

La difficulté de la mesure vient du fait que, généralement, Δl est très grand, et Δt très petit. La première mesure historique est due à l'astronome danois RÖMER en 1676, par l'interprétation des irrégularités des éphémérides des satellites de Jupiter. Il donne comme valeur 48 203 lieues par seconde, ce qui correspond à :

$$c = 214\,200 \text{ km/s.}$$

L'écart de 29 % avec la valeur actuelle a essentiellement pour origine une connaissance, défectueuse à l'époque, du rayon de l'orbite terrestre ; néanmoins, ce résultat est très important puisqu'il montre ainsi pour la première fois que la lumière a une vitesse de propagation finie. Après RÖMER, d'autres physiciens illustres se sont penchés sur le problème. Sans pouvoir les citer tous, nous donnerons malgré tout les noms de :

- FIZEAU (1849) méthode de la roue dentée.
- MICHELSON (1879) méthode du miroir tournant.

— BERGSTRAND (1950) méthode de la cellule de KERR.

— FROOME (1954) méthode de l'interféromètre hyperfréquence.

Tous les résultats de 1926 à 1954 sont rassemblés ci-après (fig. 8).

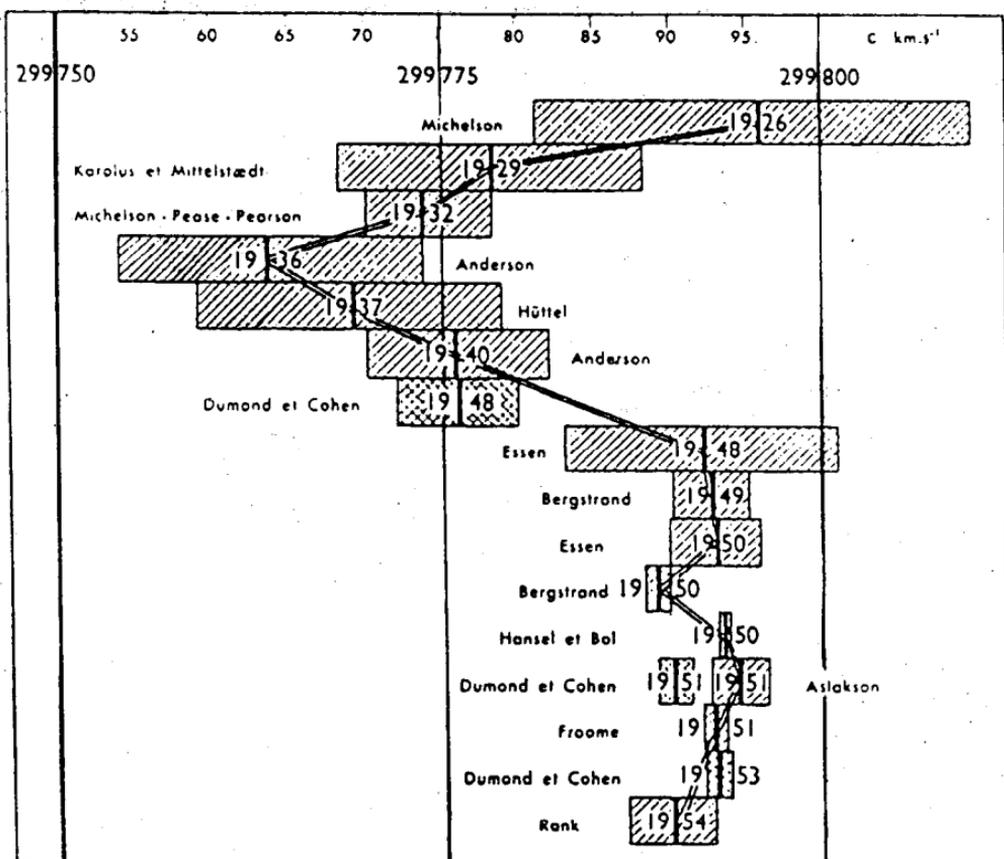


Fig. 8. — Historique des mesures de la vitesse c de 1926 à 1954.

Le meilleur résultat, qui correspond à l'apothéose de la période classique, est celui obtenu par FROOME en 1954.

$$c = 299\,792,5 \pm 0,4 \text{ km/s.}$$

Ce résultat sera adopté en 1957 par la Conférence Internationale des Poids et Mesures et restera inchangé pendant 15 ans.

L'ERE ATOMIQUE.

L'ère atomique est un retour amélioré aux définitions à caractère universel. En choisissant en 1875 un étalon de platine irradié pour la définition du mètre, la première Conférence Internationale des Poids et Mesures a créé, bien malgré elle, une situation précaire. En effet, malgré toutes les précautions prises, une détérioration accidentelle du mètre étalon n'est pas exclue; d'autre part, et ceci est plus grave, on peut toujours craindre une évolution lente de l'étalon par déformation spontanée. La nécessité de réaliser des *témoins du mètre* est donc apparue très vite, dès lors que l'on ne pouvait plus faire confiance à la précision des mesures géodésiques pour utiliser le méridien terrestre comme étalon ou témoin du mètre.

C'est MICHELSON qui, le premier, a réalisé une comparaison entre le mètre étalon et la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium ($\lambda = 6438,472 \text{ \AA}$). Pour faire cette mesure, il est venu s'installer au Pavillon de Breteuil en 1892 avec un appareil qu'il avait construit spécialement à cet effet. L'opération, très longue, qui correspond au comptage de plus de trois millions de franges, se fait par utilisation de 9 étalons intermédiaires et en utilisant la méthode dite des excédents fractionnaires. Cette expérience est décrite en détail dans le livre d'optique de BRUHAT auquel nous renvoyons le lecteur. Nous nous contenterons de donner le principe de cette comparaison (fig. 9).

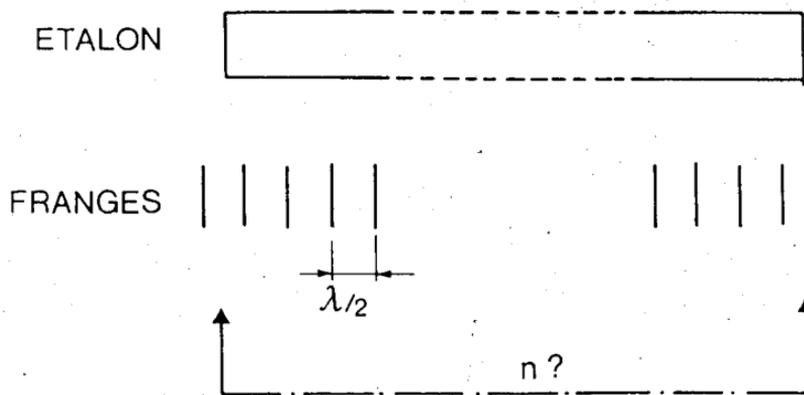


Fig. 9. — La méthode de Michelson pour la comparaison d'une longueur d'onde au mètre étalon.

Le principe de l'expérience consiste en la création, parallèlement au mètre, d'un système d'ondes stationnaires dont on repèrera les deux points qui sont situés en face des traits gravés sur l'étalon. Le comptage du nombre d'interfranges entre ces

deux points permet de passer à la longueur d'onde puisque l'inter-

frange est égal à $\frac{\lambda}{2}$ (6). MICHELSON a trouvé ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{nombre d'interfranges} \quad n = 2 \times 1\,553\,165,5 \\ \text{longueur d'onde} \quad \lambda = 0,6\,438\,472 \text{ micromètre.} \end{array} \right.$$

(Dans l'air à 15°C, sous la pression 760 mm Hg).

L'expérience a été reprise en 1913 par PEROT et FABRY, avec un interféromètre à lame semi-argentée, qui donne des raies plus fines. Ils ont trouvé ainsi pour la raie rouge du cadmium :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{nombre d'interfrange} \quad n = 2 \times 1,553\,164,13 \\ \text{longueur d'onde} \quad \lambda = 0,6\,438\,4696 \text{ micromètre.} \end{array} \right.$$

L'incertitude relative dans cette comparaison est de l'ordre de 10^{-7} . Ceci indique que la longueur d'onde de la raie orangée du cadmium peut jouer très convenablement son rôle de témoin du mètre c'est-à-dire de garantie contre toute variation imprévue de l'étalon de platine irridié. Toutefois, le cadmium ne peut pas dépasser le rôle de témoin et devenir lui-même un étalon car la raie orangée est encore trop large pour que l'on puisse espérer descendre en dessous d'une incertitude relative de 10^{-7} .

La raie orangée du krypton 86 va permettre de franchir cette limite et de créer ainsi un nouvel étalon de longueur. Le schéma de la lampe au krypton 86 est donné sur la fig. 10. C'est un tube à décharge contenant du krypton 86 sous basse pression, maintenu à basse température par un bain d'azote liquide, et soumis à une tension d'excitation relativement basse. Le krypton 86 émet alors en particulier une raie orangée très fine et la longueur d'onde au centre de la raie peut être pointée avec une incertitude relative de 10^{-8} ; elle correspond à $\lambda = 0,60577802 \mu\text{m}$.

La qualité du résultat est liée aux choix techniques de cette lampe qui donne une raie très fine pour les raisons suivantes :

- La basse tension d'excitation limite l'effet STARK et les raies satellites qui élargiraient la raie principale.
- Le spin du noyau de krypton 86 est nul, ce qui exclut l'interaction hyperfine et les satellites qu'elle donnerait à la raie principale.

(6) Les franges observées sont des anneaux à l'infini. Pour l'anneau central, qui correspond à un angle d'incidence nul, tout se passe comme si l'on avait un système d'ondes stationnaires entre les deux faces de la lame d'interférence.

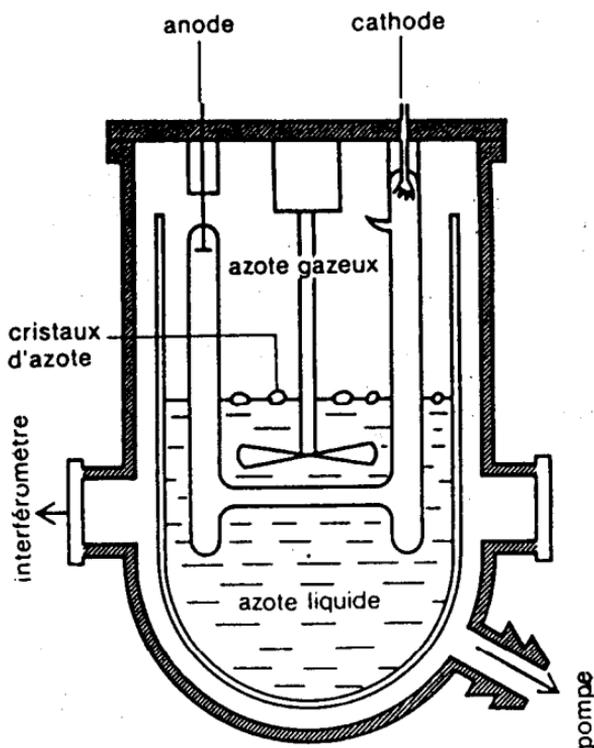


Fig. 10. — La lampe au krypton 86.

— L'élargissement de la raie due à l'effet DOPPLER est défini par la vitesse quadratique moyenne des molécules de krypton donnée par la relation $v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$. Pour diminuer au maximum v , on abaisse considérablement T en choisissant comme température de fonctionnement celle du point triple de l'azote ($T = 63 \text{ K}$); d'autre part, le choix du krypton 86, atome lourd, est favorable, puisque la masse m figure au dénominateur dans l'expression de la vitesse quadratique moyenne.

C'est donc l'ensemble de tous ces raffinements techniques qui permet d'atteindre une incertitude relative de 10^{-8} .

LA TROISIÈME DÉFINITION DU MÈTRE est donc adoptée en 1960 par la 11^e Conférence Internationale des Poids et Mesures.

« 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 ».

La physique atomique vient ainsi de nous donner un étalon de longueur amélioré puisque l'on a gagné un ordre de grandeur sur la qualité de la définition ($10^{-7} \rightarrow 10^{-8}$). La physique atomique va nous donner aussi un étalon de temps d'une qualité encore plus exceptionnelle.

L'horloge atomique est d'abord une horloge à quartz, c'est-à-dire qu'elle est tout à fait analogue à ces montres-bracelet vendues dans le commerce à un prix dérisoire et qui sont d'une stabilité remarquable pour les usages courants. L'oscillateur de base est piloté par un petit quartz piézoélectrique dont les performances sont très bonnes. Toutefois, si l'on veut des performances exceptionnelles pour la définition d'un étalon de temps, on ne peut pas ignorer, d'une part, que le quartz est un matériau sensible aux variations de température, d'autre part, qu'il est très difficile de tailler deux quartz piézoélectriques identiques. Il est donc nécessaire de prévoir un système d'asservissement et dans ce but on va utiliser la technique du jet atomique imaginée par le physicien américain RABI. Le rôle du jet atomique est représenté schématiquement sur la fig. 11.

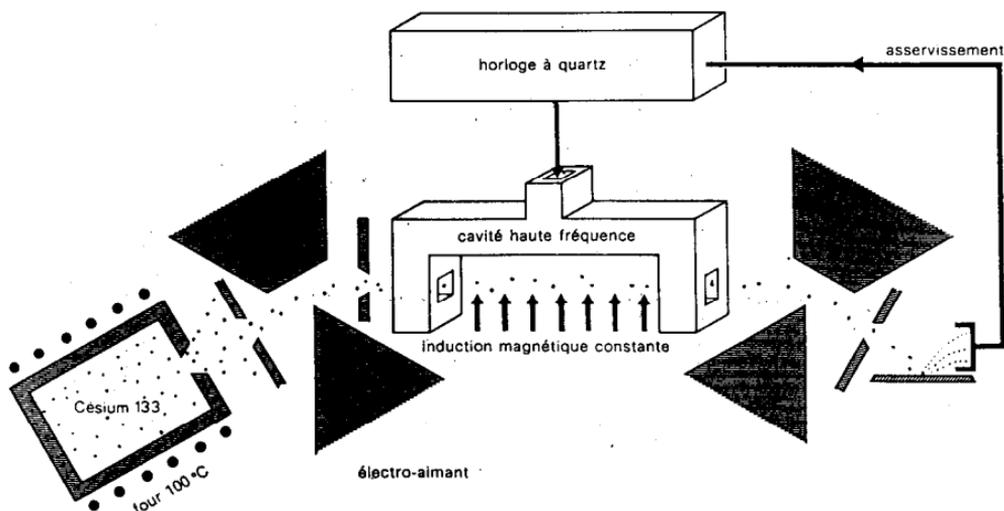


Fig. 11. — Le principe de la stabilisation de l'horloge atomique par un jet d'atomes de césium 133.

Sur la gauche du schéma, on aperçoit un four chauffé par une résistance électrique qui porte le césium 133 à l'état vapeur. Les atomes de césium 133 (gaz monoatomique) sortant de l'orifice du four sont canalisés par un deuxième diaphragme et forment un jet atomique. Ce jet passe d'abord dans un premier champ magnétique fortement inhomogène qui le sépare en deux jets d'inten-

sité égale : l'un correspondant à des atomes dont le spin est dirigé vers le haut et l'autre à des atomes dont le spin est dirigé vers le bas. Le diaphragme, situé derrière le premier champ inhomogène, ne laisse passer que le jet correspondant aux spins dirigés vers le haut, donc ne laisse passer que la moitié de l'intensité initiale. Le jet passe ensuite à travers une cavité résonante, elle-même plongée dans un champ magnétique homogène, un deuxième champ magnétique inhomogène, un dernier diaphragme, et enfin une électrode détectant les atomes de césium. Voici maintenant comment fonctionne le système :

- Supposons que la fréquence de l'horloge à quartz soit un peu différente de la fréquence de la transition faisant passer du spin dirigé vers le haut au spin dirigé vers le bas et inversement. Dans ce cas, le jet atomique n'est pas modifié ; tous les spins restent dirigés vers le haut ; les atomes passent à travers le deuxième champ inhomogène, le diaphragme de sortie, et frappent l'électrode réceptrice, qui délivre un signal de tension continue.
- Supposons maintenant que la fréquence de l'horloge à quartz soit rigoureusement la fréquence de la transition spin haut \rightarrow spin bas et inversement. Dans ce cas, un équilibre statistique s'établit dans le jet avec la moitié des spins vers le haut et l'autre moitié vers le bas. Au passage du deuxième champ inhomogène, rien n'est changé pour les spins hauts mais, par contre, les spins bas sont déviés différemment et les atomes concernés ne passent plus le dernier diaphragme. L'intensité du jet arrivant sur l'électrode réceptrice est donc diminuée de moitié par rapport au cas précédent et il en est de même du signal de tension continu délivré par cette électrode.

En clair, ceci veut dire que l'on dispose sur l'électrode d'un signal négatif, centré sur la fréquence de résonance de la transition atomique spin haut \rightarrow spin bas du césium 133 et que l'on peut utiliser ce signal pour créer un asservissement qui contrôle la stabilité de l'horloge à quartz.

On arrive ainsi à des stabilités absolues de 10^{-13} , ce qui est tout à fait extraordinaire et cela va permettre une nouvelle définition, très améliorée, de la seconde.

La seconde de l'horloge atomique a été adoptée en 1964 par la Conférence Internationale des Poids et Mesures ». C'est la durée correspondant à 9 192 631 770 périodes de la radiation relative à la transition entre les niveaux hyperfins $F = 4$, $M_F = 0$ et $F = 3$, $M_F = 0$ de l'état fondamental $2S_{1/2}$ de l'atome de césium 133 non perturbé par les champs extérieurs ». L'incertitude relative globale (stabilité et reproductibilité) est égale à 10^{-13} . C'est certainement l'appareil de physique le plus précis qui ait été construit par l'humanité.

Cette stabilité garantie à 10^{-13} est valable non seulement pour les durées, mais aussi pour les dates. Une horloge atomique particulière pourrait ainsi définir une échelle de temps à 10^{-13} près mais elle ne serait pas autorisée à s'arrêter sans tout remettre en cause. En clair, cela suppose l'absence d'usure, de pannes et d'accidents, situation particulièrement inconfortable.

Il est donc nécessaire en fait de disposer d'un grand nombre d'horloges atomiques réparties dans les principaux observatoires du monde entier et d'accorder entre elles ces différents horloges en les mettant en communication par l'intermédiaire d'un satellite artificiel. Cette opération se fait effectivement, avec une incertitude relative de 10^{-11} , et elle permet de définir le temps coordonné.

Le temps coordonné, temps des horloges atomiques, est actuellement la meilleure définition de l'échelle de temps. L'incertitude relative de 10^{-11} correspond à une erreur maximale de 1 seconde tous les 5 000 ans. On voit qu'il est très supérieur en qualité au temps des éphémérides (1 seconde tous les 25 ans) et au temps universel (1 seconde tous les 3 mois).

Le point de départ du temps coordonné est l'année tropique 1900 et une formule de correction permet de passer du temps coordonné au temps universel, qui reste le temps fondamental pour définir nos rythmes de vie. Cette formule est ajustée fréquemment en rajoutant des secondes afin que l'écart entre le temps coordonné corrigé et le temps universel ne dépasse pas 1 seconde.

La mesure de la vitesse de la lumière par des méthodes classiques ne s'était pas améliorée depuis la valeur trouvée en 1954 :

$$c = (299\,792,5 \pm 0,4) \text{ km/sec.}$$

On peut légitimement espérer que la physique atomique, avec les nouveaux étalons de longueur et de temps qu'elle nous propose, va nous permettre de franchir une nouvelle étape. Il faudrait, pour cela, disposer d'un oscillateur dont on mesurerait la longueur d'onde et la fréquence, ce qui donnerait la vitesse de la lumière par la relation :

$$c = \lambda \nu.$$

Les étalons de longueur et de temps sont :

— La lampe au krypton 86 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = 0,6057\,7802 \text{ } \mu\text{m,} \\ \nu = 4,949\,10^{14} \text{ hertz.} \end{array} \right.$$

Dans ce cas, la longueur d'onde est connue avec toute la précision de définition de l'étalon de longueur (10^{-8}). Par contre,

la fréquence est considérable et sa mesure précise pose des problèmes très délicats.

— L'horloge atomique au césium 133 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = 3,261 \text{ centimètres,} \\ \nu = 9\,192\,631\,770 \text{ hertz.} \end{array} \right.$$

Dans ce cas, la fréquence est connue avec toute la précision de définition de l'étalon de temps (10^{-13}). Par contre, la longueur d'onde, centimétrique, se prête mal à une mesure de longueur par une méthode interférentielle. Pour atteindre une incertitude relative de 10^{-8} , il faudrait réaliser un champ d'interférences de l'ordre de 10^6 franges, ce qui reviendrait à travailler sur une base de l'ordre de 16 km dans le vide, et ceci paraît tout à fait irréalisable.

Pour tirer tout le parti de la qualité des étalons atomiques, il apparaît donc nécessaire de trouver un oscillateur intermédiaire très stable, dont la longueur d'onde reste proche du micromètre, et dont la fréquence reste inférieure à 10^{14} hertz. Ce rôle va être joué par le laser hélium-néon stabilisé par absorption saturée dans le méthane.

ENFIN, LE LASER VINT.

Sans entrer dans une théorie exhaustive, rappelons brièvement le fonctionnement du laser hélium-néon (fig. 12).

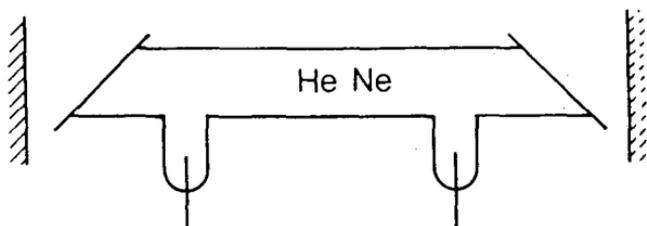


Fig. 12. — Le laser hélium-néon.

Le mélange gazeux hélium-néon à basse pression (10^{-1} torr) est contenu dans un tube de verre fermé par deux lames à faces parallèles de qualité optique. Le plan de chacune de ces lames fait avec l'axe du tube un angle correspondant à l'incidence brewstérienne, ce qui élimine *a priori* toute réflexion de la lumière incidente. Au-delà des lames de sortie, deux miroirs, l'un argenté, l'autre semi-argenté, définissant les dimensions de la cavité résonante que constitue le laser. L'énergie est introduite dans le mélange gazeux par une décharge électrique continue et elle provoque, par excitation des atomes de néon, une inversion de population. Le milieu devient alors apte à l'amplification de

lumière par émission stimulée et une onde lumineuse va se propager le long de l'axe du tube en se réfléchissant à chaque extrémité en même temps qu'elle s'amplifie. Un régime permanent s'établit, avec un faisceau de lumière cohérente, très bien dirigé, qui sort du laser à travers la lame semi-argentée. On remarquera que le laser est un interféromètre à ondes multiples du type PEROT et FABRY et c'est pourquoi la raie émise est d'une grande finesse.

Il est intéressant de comparer la largeur des raies émises par une lampe au krypton 86 et par un laser (fig. 13).

Pour la lampe au krypton 86, c'est l'effet DOPPLER qui limite la finesse, et ceci malgré la basse température de fonctionnement (fig. 13, courbe 1).

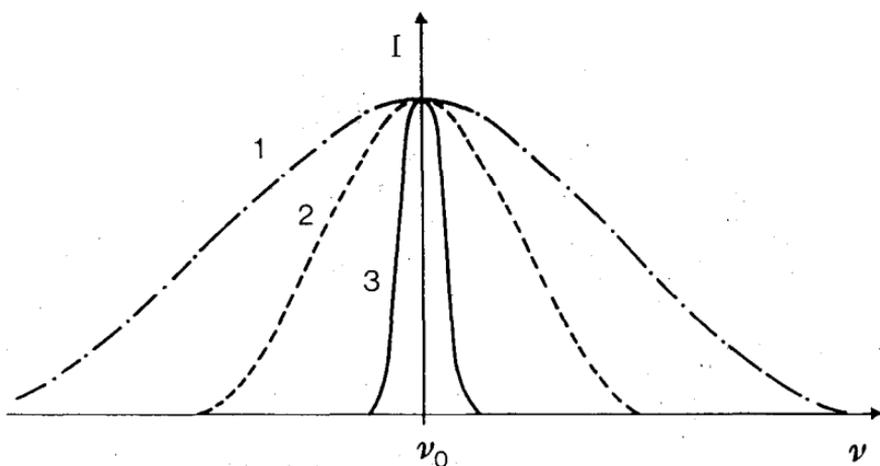


Fig. 13. — Les origines de la largeur d'une raie spectrale.

Imaginons que l'on puisse, sans casser la lampe, abaisser encore considérablement la température du krypton 86 de façon à rendre l'effet DOPPLER négligeable. La largeur se trouverait réduite à la largeur naturelle Γ , celle qui correspond à la 4^e inégalité de HEISENBERG. $\Gamma \cdot \tau \geq \hbar/2$ (fig. 13, courbe 2). On a cru longtemps — à tort — que la largeur naturelle représentait une limite infranchissable puisqu'elle était donnée par la 4^e inégalité de HEISENBERG. En fait, elle correspond seulement à l'application de cette inégalité dans le cas d'une population d'atomes excités indépendants émettant de façon incohérente.

Au contraire, si l'on envisage une population d'atomes émettant de la lumière cohérente — ce qui est le cas du laser —

l'inégalité de HEISENBERG s'applique toujours sous la forme $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ où Δt est la durée du train d'ondes et ΔE la largeur de la raie émise. On observe dans ce cas-là des raies particulièrement fines dues à l'interfréquence à ondes multiples (fig. 13, courbe 3).

Le gain en finesse est d'un facteur 1 000 par rapport à la lampe au krypton 86.

Le laser serait donc *a priori* un bon candidat pour se substituer à la lampe au krypton 86 dans la définition d'un étalon de longueur d'onde. Mais ce n'est malheureusement pas si simple. Il ne suffit pas que la raie soit très fine, encore faudrait-il qu'elle soit très stable. Or, justement, la longueur d'onde de la raie laser est définie par la distance qui sépare les deux miroirs extrêmes de la cavité résonante. Cette définition repose donc sur un système mécanique qui pose *a priori* de gros problèmes de stabilité et de reproductibilité. Il n'y a donc *a priori* aucune chance de faire mieux dans ce domaine qu'avec l'ancien étalon de platine irridié, à moins que l'on ne soit capable de contrôler les vibrations mécaniques du système par un phénomène atomique beaucoup plus stable, reprenant ainsi un principe déjà utilisé dans la définition de la seconde.

Le laser stabilisé par absorption saturée a été développé à partir de 1967 et nous en donnons un schéma sur la fig. 14.

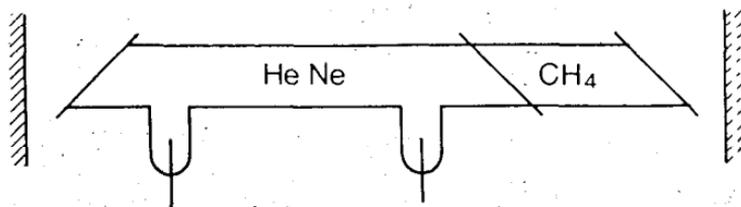


Fig. 14. — Le laser hélium néon à absorption saturée dans le méthane.

Au laser hélium-néon classique, on adjoint une cuve supplémentaire contenant du méthane gazeux et dans laquelle la lumière laser fera des aller-retour en allant se réfléchir sur les miroirs.

Le phénomène d'absorption saturée est possible du fait de la très grande densité énergétique du faisceau laser. Le terme saturation indique que tous les atomes susceptibles d'entrer en résonance, lorsqu'ils sont irradiés par une lumière de fréquence ν , vont effectivement être tous excités. Examinons maintenant la fig. 15 sur laquelle on a schématisé la loi de distribution des vitesses d'agitation thermique des molécules de méthane en projection sur l'axe du laser. Cette distribution est schématisée par 44 molécules et sa forme est gaussienne.

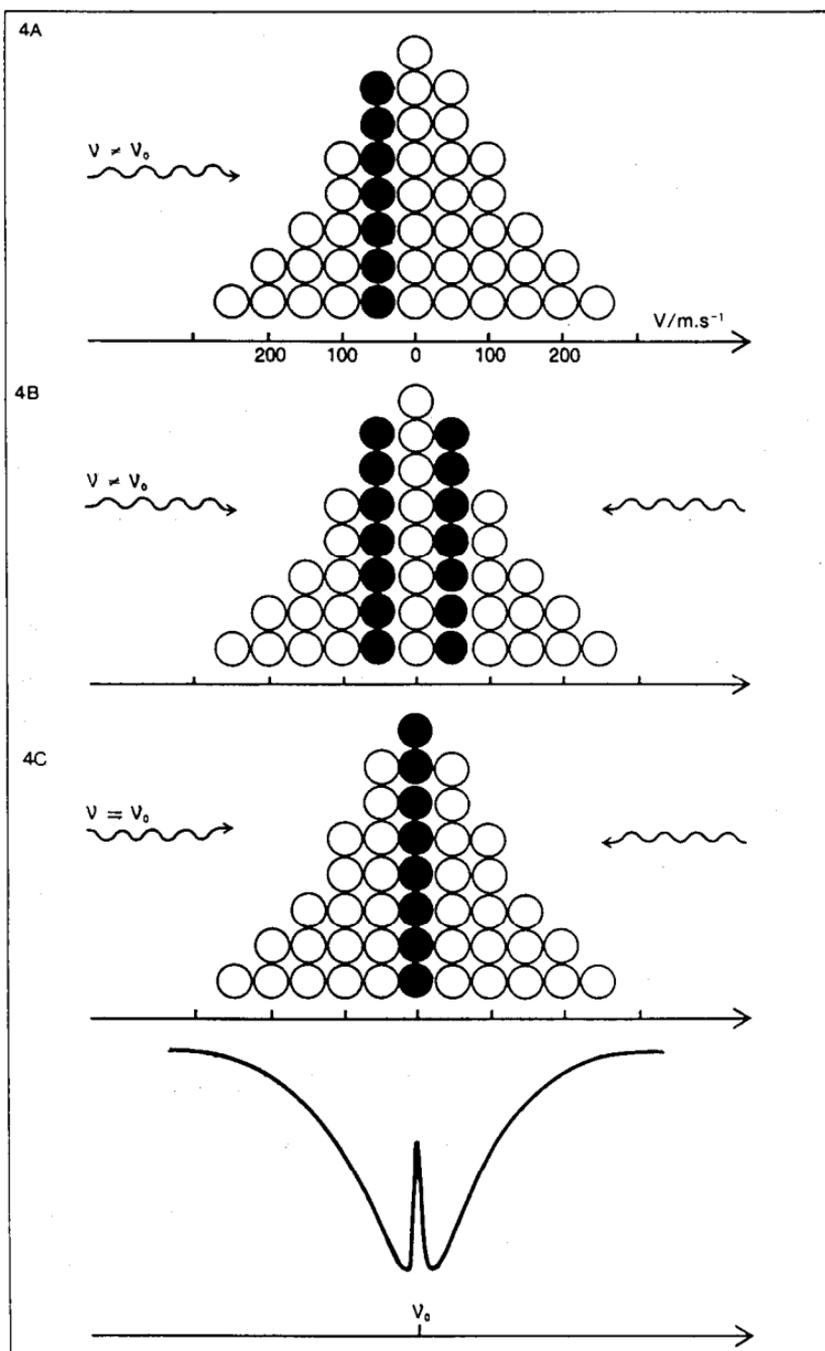


Fig. 15. — Principe de l'absorption saturée.

— Imaginons une onde lumineuse de fréquence légèrement supérieure à la fréquence centrale d'émission (ou d'absorption) du méthane et qui pénètre par la gauche dans la cuve d'absorption. Elle va exciter tous les atomes ayant une vitesse convenable en projection sur l'axe pour que la résonance ait lieu. Ce sont 7 atomes représentés en noir sur le schéma.

— Au retour, après réflexion, sans changement de fréquence, l'onde lumineuse va exciter les atomes ayant une composante de vitesse opposée à la précédente. Ce sont 7 autres atomes représentés en noir sur le schéma.

En bref, pour une onde de fréquence légèrement supérieure à la fréquence centrale, ce sont 14 atomes qui sont absorbants sur la représentation schématique après un aller-retour.

— Au contraire, si la fréquence de l'onde est rigoureusement égale à la fréquence centrale, ce sont à l'aller 8 atomes qui sont excités sur le schéma et, au retour, il n'y en aura pas d'autre, parce que l'absorption est saturée. Si l'on compare à l'aller-retour du cas précédent, on voit que le bilan d'absorption est plus faible puisque 8 atomes seulement sont excités au lieu de 14.

Nous pouvons donc maintenant donner au bas de la fig. 15 l'allure générale de la courbe d'absorption. Pour toutes les fréquences un peu éloignées de ν_0 , elle a la forme classique d'une cloche renversée mais au voisinage de ν_0 , on observe un pic très étroit qui va nous ouvrir des voies nouvelles pour la stabilisation de la raie laser.

En effet, on peut imaginer facilement que si l'on impose à un faisceau laser issu du milieu émetteur hélium-néon un phénomène d'absorption saturée représenté par la fig. 16 a, on obtiendra une raie d'émission de forme très particulière représentée sur la fig. 16 b.

On observe sur le profil de la raie une partie très étroite correspondant à un petit pic d'émission qui pourra servir à contrôler un asservissement.

Le laser hélium-néon, stabilisé par absorption saturée dans le méthane, est représenté sur la fig. 17. Le premier miroir limitant la cavité est animé d'un mouvement vibratoire mécanique et le deuxième miroir est asservi au premier de façon que leur distance mutuelle reste constante. L'asservissement est contrôlé par le pic d'absorption saturée du méthane et l'on arrive ainsi à des performances de stabilité de 10^{-11} tandis que se profilent à l'horizon des performances bien meilleures qui pourraient aller jusqu'à 10^{-14} .

La mesure de la longueur d'onde du laser hélium-néon stabilisé par le méthane peut se faire par une méthode interfé-

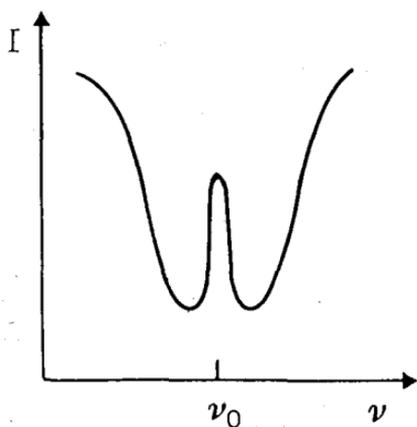


Fig. 16 a. — Courbe d'absorption du laser à absorption saturée.

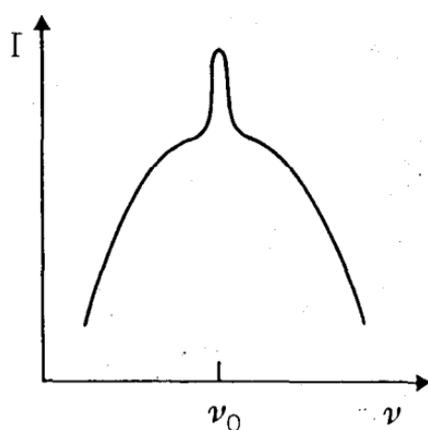


Fig. 16 b. — Courbe d'émission du laser à absorption saturée.

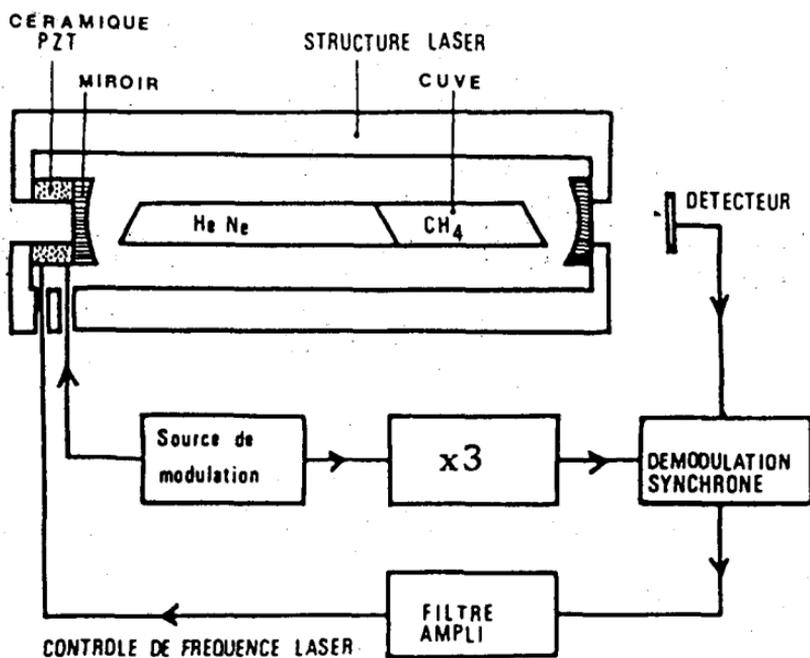


Fig. 17. — Schéma complet du laser hélium néon stabilisé par absorption saturée dans le méthane.

rentielle, inspirée de la méthode de MICHELSON présentée au début de cet article. Cette mesure n'est pas très facile car il s'agit de

comparer la longueur d'onde du laser, située dans l'infrarouge ($\lambda = 3,392 \mu\text{m}$) à la longueur d'onde de la lampe au krypton 86 située dans le visible ($\lambda = 0,6057 \mu\text{m}$) puisque c'est cette lampe qui définit l'étalon de longueur. On est parvenu à surmonter ces difficultés et l'on a trouvé pour le laser au méthane le résultat suivant :

$$\lambda = (3\,392\,231,4 \pm 0,013) \text{ pm.}$$

L'incertitude relative sur ce résultat est de $4 \cdot 10^{-9}$; elle n'est pas due au laser lui-même, stabilisé à 10^{-11} , mais à l'incertitude sur la définition de l'étalon de longueur par la lampe au krypton 86. On voit donc apparaître ici une limite dans la précision de définition des longueurs et l'on pressent qu'il faudra abandonner l'étalon krypton 86 choisi en 1960 pour aller vers de nouvelles définitions. Mais il faut, avant tout cela, être capable de mesurer de façon très précise la fréquence du laser au méthane.

La mesure de fréquence est *a priori* très difficile. Il s'agit de comparer la fréquence du laser $\nu = 9 \cdot 10^{13}$ hertz à celle du césium 133 de l'horloge atomique $\nu = 9 \cdot 10^9$ hertz. C'est donc un facteur 10^4 qui sépare les deux fréquences et, pour couvrir cet intervalle, il faudra utiliser une technique subtile de battements avec 5 étapes successives. Le cœur du dispositif expérimental est une diode, que son aspect extérieur a fait baptiser « diode moustache », et que nous avons représentée sur la fig. 18.

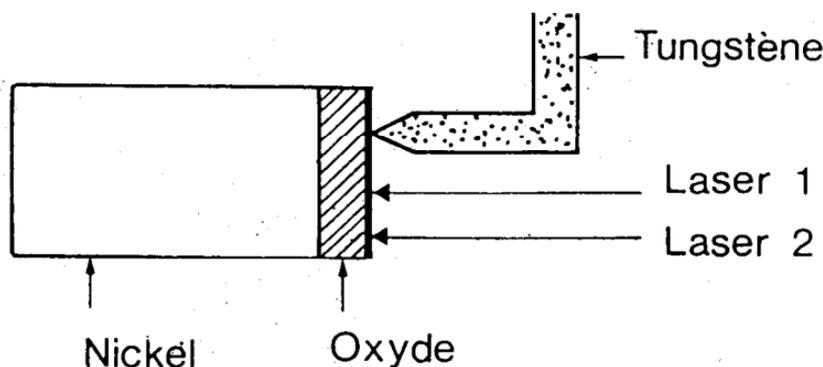


Fig. 18. — La diode moustache.

Très inspirée des anciennes galènes des postes récepteurs de l'âge héroïque, la diode moustache comporte par exemple une base de nickel pur recouverte d'une couche d'oxyde, sur laquelle vient presser une pointe de tungstène réglée par une vis micrométrique. La diode moustache va fonctionner en photodiode lors-

qu'on envoie sur la couche d'oxyde deux faisceaux d'ondes électromagnétiques issues des deux lasers dont on veut comparer les fréquences. Le montage complet de l'expérience est représenté sur la fig. 19. Une lame semi-argentée permet de mélanger les deux faisceaux laser et de les envoyer ensemble sur la photodiode. Cette dernière est reliée à un fréquencemètre qui permet la mesure de la fréquence de battement entre les deux lasers.

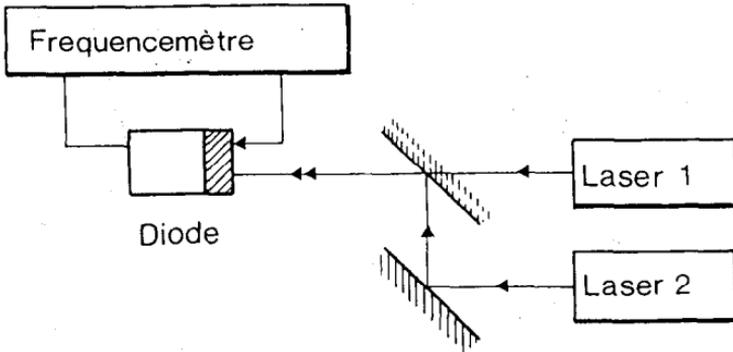


Fig. 19. — La mesure d'une fréquence élevée par battements entre deux lasers.

Le fréquencemètre est utilisable jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10^{11} hertz mais pas au-delà. Il est donc nécessaire de réaliser entre les deux lasers des battements de fréquence inférieurs à cette limite. C'est là qu'intervient la diode moustache et son défaut principal va devenir une qualité. En effet, cette diode n'est pas linéaire ; elle déforme considérablement les signaux sinusoïdaux qu'on lui envoie, ce qui veut dire qu'elle crée une suite très importante d'harmoniques de la fréquence fondamentale. Un choix d'harmonique convenable doit permettre d'obtenir un battement de fréquence inférieur à 10^{11} hertz.

Prenons par exemple un laser stabilisé au dioxyde de carbone. Sa fréquence est $\nu = 29,442483315 \cdot 10^{12}$ hertz. L'harmonique 3 correspond donc à $88,327449945 \cdot 10^{12}$ hertz. Le laser au méthane a une fréquence de $88,376181627 \cdot 10^{12}$ hertz. Il battra avec l'harmonique 3 en donnant seulement une fréquence de $0,48731682 \cdot 10^{11}$ hertz.

Cette fréquence est mesurable avec précision sur le fréquencemètre car nous restons dans la gamme d'utilisation de l'appareil.

On peut ainsi, par étapes successives, passer de l'horloge atomique au laser au méthane sans jamais dépasser les limites de mesure des fréquences de battement.

Toutes les étapes sont définies sur le tableau suivant :

Source	Fréquence (Hz)	Longueur d'onde	Harmonique utilisé
Césium (étalon)	$9,192\ 631\ 770 \cdot 10^9$	32,6 cm	
Klystron	$74 \cdot 10^9$	4,05 mm	12
Laser HCN	$0,8907595 \cdot 10^{12}$	337 μ m	12
Laser H ₂ O	$10,718073 \cdot 10^{12}$	28 μ m	3
Laser CO ₂	$\left\{ \begin{array}{l} 29,442483315 \cdot 10^{12} \\ 32,134266891 \cdot 10^{12} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 10,4 \mu\text{m} \\ 9,4 \mu\text{m} \end{array} \right.$	3
Laser HeNe(CH ₄)	$88,376181627 \cdot 10^{12}$	3,39 μ m	

La première mesure de ce type a été réalisée pour la première fois en 1972 et elle a donné pour le laser hélium-néon stabilisé au méthane la fréquence suivante :

$$\nu = (88\ 376\ 181\ 627 \pm 50) \text{ kHz} \quad (7).$$

L'incertitude relative sur ce résultat est égale à $6 \cdot 10^{-10}$. Il est évident que l'on a perdu par rapport aux performances de l'horloge atomique (10^{-13}) et ceci est dû à la nécessité de travailler par étapes successives. Néanmoins, le résultat obtenu est très remarquable, et sans doute perfectible. Il va permettre de calculer une nouvelle valeur de la vitesse de la lumière avec une précision jusqu'ici inégalée.

Une détermination indirecte de la vitesse de la lumière a donc été réalisée en 1972 lorsque l'on a obtenu, pour la première fois, des valeurs très précises de la longueur d'onde et de la fréquence du laser hélium-néon stabilisé par absorption saturée dans le méthane :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = (3\ 392\ 231,4 \pm 0,013) \text{ pm} \quad (4 \cdot 10^{-9}), \\ \nu = (88\ 376\ 181\ 627 \pm 50) \text{ kHz} \quad (6 \cdot 10^{-10}). \end{array} \right.$$

On a donc pu utiliser la relation $c = \lambda \nu$ qui correspond à une détermination indirecte de la vitesse de la lumière, et l'on a trouvé ainsi :

$$c = (299\ 792\ 458 \pm 1,2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

(7) Une mesure plus récente (1980) réalisée au Laboratoire Primaire Temps Fréquence par A. Clairon, B. Dahmani et J. Rutman, donne une valeur améliorée $\nu = (88376181618,0 \pm 13,8) \text{ kHz}$.

L'incertitude relative sur cette valeur, limitée par la précision sur la mesure de λ , est de $4 \cdot 10^{-9}$. Le résultat obtenu représente un gain de plus d'un facteur 300 par rapport à la valeur trouvée en 1954 qui était :

$$c = (299\,792,5 \pm 0,4) \text{ km. s}^{-1}.$$

La performance de 1972 est donc tout à fait extraordinaire et pourtant elle nous laisse une pointe de regret. L'incertitude relative de $4 \cdot 10^{-9}$ a pour origine la limite de précision dans la définition de l'étalon de krypton 86 et nous ne pouvons pas profiter des qualités de la mesure de fréquence pour lesquelles la limite actuelle, et certainement perfectible, se situe à $6 \cdot 10^{-10}$, c'est-à-dire qu'elle est meilleure d'un ordre de grandeur. On entrevoit donc une amélioration possible en changeant la définition de l'unité de longueur et ceci va nous conduire en fait à une transformation révolutionnaire du système métrique.

L'AN 1983 OU LA REVOLUTION DU SYSTEME METRIQUE.

Les origines de la Révolution sont contenues dans la relation :

$$\begin{array}{ccccccc} & & c & = & \lambda & \times & \nu \\ \text{Incertitude} & \rightarrow & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ \text{relative} & & 4 \cdot 10^{-9} & & 4 \cdot 10^{-9} & & 6 \cdot 10^{-10} \\ & & & & \uparrow & & \uparrow \\ & & & & \text{limité par} & & \text{pouvant être} \\ & & & & \text{le krypton 86} & & \text{amélioré} \end{array}$$

Cette relation suggère deux options possibles pour améliorer la définition de l'étalon de longueur.

Première option : le changement dans la continuité :

— La définition de la seconde par le césium 133 reste conservée. Son incertitude relative est de 10^{-13} .

— La lampe au krypton 86 est abandonnée. Elle est remplacée par le laser stabilisé au méthane, dont la longueur d'onde définit le mètre :

$$\lambda = 3\,392\,231,400\,00 \text{ pm.}$$

L'incertitude relative est de 10^{-11} , performance actuelle du laser stabilisé.

Analysons maintenant les conséquences d'une telle option :

- Le gain de précision dans la définition de l'étalon de longueur est important : $10^{-8} \rightarrow 10^{-11}$.
- Il faudra continuer à réviser la valeur de c chaque fois que l'on améliorera la mesure de la fréquence du laser stabilisé par le méthane. En effet, dans la formule $c = \lambda \nu$ si c est défini, ν est mesurable et l'on doit pouvoir faire mieux que $6 \cdot 10^{-10}$.

- Il faudra enfin changer la définition de l'étalon de longueur dès que l'on aura réalisé un laser stabilisé meilleur que le laser au méthane. Ceci est beaucoup plus inquiétant car l'on sait pertinemment que la technique des lasers stabilisés est en pleine expansion et l'on risque de se trouver rapidement dans une situation où les performances des étalons changent bien plus vite que les définitions. Rappelons-nous que le mètre de platine irridié a régné de 1875 à 1960, soit 85 ans, alors que la lampe au krypton 86 ne règnera que de 1960 à 1983, c'est-à-dire 23 ans. On voit naître ainsi un processus d'accélération, très désagréable lorsqu'il s'agit d'un système d'unité.

C'est en ayant donc pleine conscience de ces inconvénients que les métrologistes ont choisi une deuxième option.

Deuxième option : la révolution universelle.

Voici les bases des nouvelles définitions :

- La seconde du césium 133 est conservée avec son incertitude relative de 10^{-13} .
- La longueur est abandonnée comme grandeur fondamentale et remplacée dans ce rôle par la grandeur vitesse.
- L'étalon universel de vitesse est la vitesse de la lumière dans le vide.
- Le mètre devient alors une unité dérivée calculée à partir de la valeur de la vitesse de la lumière déterminée en 1972.

La quatrième définition du mètre se présente donc ainsi :

« Le mètre est la distance parcourue par la lumière dans le vide en un temps égal à $(1/299\,792\,458)$ seconde » (8).

Cette définition sera adoptée en 1983 par la Conférence Internationale des Poids et Mesures.

Les conséquences de cette 4^e définition sont particulièrement intéressantes :

- La valeur c de la vitesse de la lumière dans le vide est fixée une fois pour toutes.
- La définition de la valeur du mètre est améliorée de 10^{-8} à 10^{-11} , c'est-à-dire au niveau de la performance du laser stabilisé par le méthane.
- La valeur effective du mètre changera avec les progrès des lasers stabilisés par absorption saturée et un horizon de 10^{-14} n'est pas exclu.

(8) Il se peut que la formulation finalement adoptée soit un peu différente, mais l'esprit restera le même.

— La définition du mètre, elle, ne changera plus, dans la mesure où la valeur de c est fixée une fois pour toutes.

Cette nouvelle définition ne va pas modifier les techniques de laboratoire mais elle va changer nos habitudes de pensée et il est intéressant de se demander ce que va devenir alors une mesure absolue de longueur d'onde — donc de longueur — avec un laser stabilisé.

La mesure absolue de longueur d'onde sera en fait une mesure de la fréquence ν , en hertz, puis on écrira ensuite :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{299\,792\,458}{\nu}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \text{ en mètre,} \\ \nu \text{ en seconde}^{-1}. \end{array} \right.$$

Ce sera donc une répétition améliorée de la mesure de 1972 mais avec de nouveaux lasers stabilisés. Ceci n'exclut pas, bien sûr, des mesures relatives de longueur d'onde en comparant deux lasers par la méthode interférentielle de MICHELSON.

AVONS-NOUS FAIT LE BON CHOIX ?

Lorsque l'on se lance dans une opération qui présente quelques risques, il est fréquent d'assurer ses arrières par la technique bien connue du bouc émissaire, en impliquant les astrophysiciens dans l'opération.

Les astrophysiciens ont été les premiers à utiliser la vitesse de la lumière comme unité fondamentale puisqu'ils mesurent les distances en années-lumière. On peut toujours imaginer qu'ils apprécieront le fait de disposer d'une unité, la vitesse de la lumière, dont la définition ne changera plus, et dont l'expression en mètre est donnée avec 9 chiffres significatifs. Mais si l'on veut bien remarquer que les distances interstellaires ou intergalactiques ne sont connues qu'avec une précision très modeste (10 à 50 %), il est bien évident qu'une performance de 10^{-8} ou de 10^{-11} est sans intérêt pour l'astrophysique. Les physiciens doivent donc prendre leurs responsabilités en justifiant ce changement révolutionnaire des unités pour des raisons objectives et c'est ce que nous allons tenter de faire maintenant.

VERS LE SYSTEME CKS.

En remplaçant une longueur par une vitesse, on abandonne implicitement le système d'unité mécanique MKS pour un nouveau système d'unité mécanique que l'on pourrait appeler CKS. Les performances des différentes options possibles sont représentées sur le tableau suivant :

Systeme d'unité	Unité	Etalon	Incertitude relative
M K S	mètre kilogramme seconde	krypton 86 Platine irridié Césium 133	10^{-8} 10^{-8} 10^{-13}
M K S (1ère option)	mètre kilogramme seconde	Laser CH ₄ Platine irridié Césium 133	10^{-11} 10^{-8} 10^{-13}
C K S (2ème option)	lumière kilogramme seconde	Vitesse C Platine irridié Césium 133	10^{-15} 10^{-8} 10^{-13}

La première ligne représente l'état actuel du système MKS.

La deuxième ligne représente ce que deviendrait le système MKS si l'on remplaçait dans la définition de l'unité de longueur, la lampe au krypton 86 par le laser au méthane. Le gain de l'opération serait alors d'un facteur 1000 puisque l'on passerait d'une valeur de 10^{-8} à une valeur de 10^{-11} pour l'incertitude relative.

La troisième ligne représente ce que deviendra effectivement le système d'unité mécanique quand on adoptera la vitesse de la lumière comme unité fondamentale. Il est toutefois important de s'assurer d'abord de sa constance dans le vide quelque soit sa fréquence, donc de se demander si le vide n'est pas un milieu dispersif, et cette question n'est pas absurde si l'on souhaite obtenir des performances meilleures que 10^{-11} . La réponse est venue de l'astrophysique par l'observation du pulsar du Crabe.

La Nébuleuse du Crabe, de forme tourmentée très caractéristique, est une nébuleuse gazeuse, située dans la Galaxie, à une distance de 6 500 années-lumière. Elle est le résidu apparent de l'explosion de la supernova de 1054. Au centre de la nébuleuse, se trouve un résidu beaucoup moins apparent. C'est un pulsar dont le nom de code est NP 0532. Il s'agit donc d'une étoile à neutrons, en rotation rapide sur elle-même, avec une période de 33 ms, augmentant de 39 ns par jour (9). Cette étoile émet un rayonnement électromagnétique dans une très large bande de fréquence, depuis les ondes radio, jusqu'aux rayons γ . La forme de l'impulsion reçue sur la Terre est représentée sur la fig. 20. C'est une impulsion de forme complexe, étalée sur 20 ms, et qui

(9) Sa période exacte était de 0,033 099 324 s le 28 juin 1969.

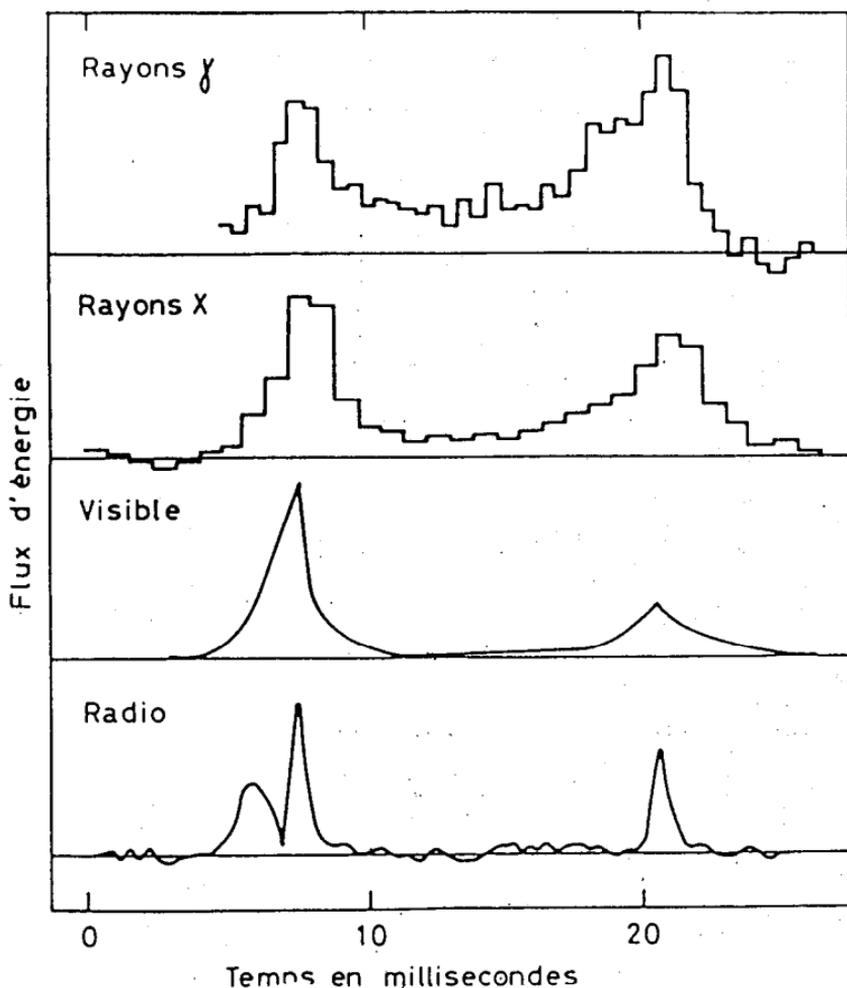


Fig. 20. — La forme de l'impulsion du pulsar du Crabe (NP 0532). Cette forme évolue au cours du temps mais, par contre, l'impulsion se répète avec régularité toutes les 33 ms. Cette période augmente très lentement de 39 ns par jour.

se répète avec régularité toutes les 33 ms. Cette forme varie avec la fréquence du rayonnement étudié, mais il existe deux pics caractéristiques pour les 4 courbes observées, qui apparaissent en phase à la réception, et qui ne peuvent être qu'une phase à l'émission, puisque c'est la rotation du pulsar qui est à l'origine de la « pulsation » observée. Le rayonnement électromagnétique a donc voyagé pendant 6 500 ans sans qu'un déphasage appré-

ciable s'introduise entre les rayons γ et les ondes radios. Le vide n'est donc pas dispersif, et la limite que l'on va fixer ainsi se situe très bas. Le pointé de chaque pic peut être fait avec une précision de 0,1 ms (10), et cette valeur représente le déphasage absolu maximum en 6 500 ans. La valeur relative sera :

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{10^{-4}}{6\,500 \times 365 \times 86\,400} = 0,5 \cdot 10^{-15}.$$

L'incertitude relative sur la vitesse c , nouvel étalon, sera donc $\Delta c/c < 10^{-15}$.

La vitesse de la lumière est donc une remarquable unité fondamentale pour la définition d'un système d'unités mécaniques puisqu'elle permet de remplacer l'unité de longueur de l'actuel système MKS, définie à 10^{-8} , par une unité de vitesse définie à mieux que 10^{-15} , ce qui représente un gain de 10^7 . C'est la raison profonde du changement envisagé et ce changement doit intervenir à la prochaine Conférence Internationale des Poids et Mesures, qui se tiendra en 1983.

Le système CKS reposera donc sur des bases particulièrement solides ; la vitesse de la lumière définie à 10^{-15} et la seconde de l'horloge atomique définie de 10^{-13} . Quant au kilogramme-masse, on peut dire qu'il deviendra « la tare » de ce système d'unité puisque sa définition ne sera pas meilleure que 10^{-8} . Il serait très intéressant de remplacer l'étalon de platine irridié du pavillon de Breteuil par une unité naturelle et universelle comme la masse du proton ou celle de l'électron. Mais ceci suppose au préalable une amélioration très importante de la précision de détermination du nombre d'Avogadro. Il n'y a aucune perspective de progrès à court ou moyen terme dans ce domaine.

PEDAGOGIE DU SYSTEME CKS.

Ce changement dans les définitions et dans nos habitudes ne doit pas nous inquiéter, car il va faciliter notre travail pédagogique. Mettons-nous à la place d'un élève de seconde qui ignore ce qu'est une longueur d'onde et une transition atomique et demandons-nous si la définition du mètre par la lampe au krypton 86 lui paraît vraiment convaincante. On peut honnêtement espérer une approbation polie mais certainement pas de l'enthousiasme.

(10) Il est possible d'accéder à une précision encore meilleure par une analyse statistique poussée sur un grand nombre de périodes. La difficulté vient des variations en intensité des impulsions au cours du temps.

Envisageons au contraire l'actuel programme de seconde axé sur la cinématique et la définition de la vitesse. La définition du mètre en découle tout naturellement : c'est la distance parcourue par la lumière dans le vide en une fraction de seconde. La valeur de cette fraction est effectivement un peu compliquée : $1/299\,792\,458$, et il serait à la fois contraignant et inutile de demander à nos élèves de la retenir par cœur. Par contre, il est important qu'ils connaissent un ordre de grandeur raisonnable de cette fraction, correspondant à la valeur $1/300\,000\,000$, ce qui revient à dire que la vitesse de la lumière dans le vide est de $300\,000$ km par seconde, résultat classique s'il en fut.

Les équations aux dimensions du système CKS seront naturellement différentes de celles du système MKS mais elles seront aussi faciles à obtenir. Pour fixer les idées, en voici quelques exemples :

longueur	$[L] = [C] [T]$
vitesse	$[C]$
quantité de mouvement	$[P] = [M] [C]$
force	$[F] = [M] [C] [T]^{-1}$
travail	$[W] = [M] [C]^2$

EINSTEIN EST AVEC NOUS.

L'apparition de la célèbre formule d'EINSTEIN $W = m c^2$ sous la forme d'une équation aux dimensions est peut-être inattendue mais elle est en fait très logique. Dans la mesure où l'on donne à la lumière un rôle privilégié pour la constitution du système d'unité, il est bien évident que toutes les lois physiques où la vitesse c joue un rôle important, réapparaîtront sous la forme d'équations aux dimensions. L'apparition de $W = m c^2$ n'est donc pas miraculeuse mais elle est sécurisante ; la présence occulte du père fondateur de la physique moderne vient à point pour nous rassurer. Rappelons-nous aussi qu'il avait l'art de bousculer nos idées reçues. L'arrivée en force du système CKS sera un de ces tours malicieux dont il avait le secret.

Remerciements.

M. BOUCHARÉINE, spécialiste des mesures de longueur d'onde et M. RUTMAN, spécialiste des mesures de fréquence, m'ont fait parvenir une très abondante documentation sur ces sujets. Je tiens à les en remercier très vivement ici.

BIBLIOGRAPHIE

-
- P. BOUCHARÉINE. — *Le mètre, la seconde et la vitesse de la lumière*. La Recherche n° 91, juillet 1978, p. 634.
 - P. BOUCHARÉINE. — *L'optique, de la connaissance fondamentale aux applications*. J. Optics (Paris), 1980, vol. 11, n° 6, p. 409.
 - P. BOUCHARÉINE. — *La définition de l'unité de longueur*. Bulletin B.N.M., n° 43, janvier 1981, p. 12.
 - J. RUTMAN. — *Les générateurs de fréquences étalon dans les gammes submillimétriques, infrarouge, et visible du spectre électromagnétique*. L'onde électrique, 1979, vol. 59, n° 3.
 - J. RUTMAN. — *Utilisation des satellites artificiels en métrologie du temps*. Bulletin B.N.M. n° 46, octobre 1981.
 - A. CLAIRON, B. DAHMANI et J. RUTMAN. — *Nouvelles mesures de fréquence des lasers au L.P.T.F.* Bulletin B.N.M. n° 41, juillet 1980.
 - P. BAKOULINE, E. KONONOVITCH, V. MOROZ. — *Astronomie générale*. Editions Mir, Moscou, 1975.
 - J.-J. DELCOURT. — *Astronomie et mesure de temps*. Masson, 1982.
 - G. DÉVORÉ et R. ANNEQUIN. — *Unités et Mesures, Statique des fluides*. Vuibert, 1960.
 - G.-W. DORLING. — *Temps et Durée*. Thèmes Vuibert, Physique, 1975.
 - L. GOUGUENHEIM. — *Méthodes de l'astrophysique. Comment connaître et comprendre l'univers*. Liaisons scientifiques, Hachette et C.N.R.S., 1981.
 - A. HAYLI. — *Histoire de l'Univers*. Hachette, 1980.
 - J.-L. HEUDIER. — *Le temps en astronomie*. Ciel et Espace, n° 189, septembre 1982, p. 14.
 - J.-H. SANDERS. — *Les constantes atomiques fondamentales*. Monographies Dunod, 1969.
 - J. TERRIEN. — *La désignation des termes spectroscopiques du krypton et des niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de la définition du mètre de 1960*. B.U.P. n° 645, juin 1982, p. 953.
 - J. TERRIEN. — *Changement prévu de la définition du mètre*. B.U.P. n° 645, juin 1982, p. 961.
-