

# SÉMINAIRE DE PHILOSOPHIE ET MATHÉMATIQUES

BERNARD GUINOT

## L'évolution des idées dans la mesure du temps

*Séminaire de Philosophie et Mathématiques*, 1986, fascicule 2  
« L'évolution des idées dans la mesure du temps », , p. 1-18

[http://www.numdam.org/item?id=SPHM\\_1986\\_\\_2\\_A1\\_0](http://www.numdam.org/item?id=SPHM_1986__2_A1_0)

© École normale supérieure – IREM Paris Nord – École centrale des arts et manufactures,  
1986, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Séminaire de philosophie et mathématiques » implique  
l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute  
utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale.  
Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme  
Numérisation de documents anciens mathématiques  
<http://www.numdam.org/>

# L'EVOLUTION DES IDEES DANS LA MESURE DU TEMPS

par

Bernard GUINOT

## Introduction

Parler de l'évolution des idées, c'est faire une sorte de moyenne. Cette opération n'est pas parfaitement objective. La rigueur m'obligerait à faire précéder chaque assertion par des propositions du genre "il semble que", "tout se passe comme si", etc. Bien que j'omettrai le plus souvent ces marques de prudence, on voudra bien considérer qu'elles sont sous-entendues.

Le mot "temps" est extrêmement vague, comme ses équivalents en langues étrangères. En français, il désigne aussi bien, entre autres, le concept, une échelle de repérage, une durée. Quant à la mesure du temps, elle englobe la construction d'échelles de temps, d'étalons de durée et de multiples applications à tous les niveaux d'exactitude et de précision, sur une gamme de durées d'une étendue énorme. Parmi ces applications, les synchronisations (en temps-coordonnée) ont une importance pratique considérable.

Mais je limiterai cet exposé à la recherche des meilleures références temporelles, c'est-à-dire à la recherche d'une mesure du temps "uniforme" (je m'expliquerai plus tard sur ce mot "uniforme"). Il s'agit donc principalement de l'art de jalonner la dimension temps en répondant aux besoins scientifiques pour les phénomènes macroscopiques. Cela conduira à parler aussi de l'unité pour mesurer des intervalles de temps et des fréquences.



Je ferai souvent état des pensées des astronomes. Il ne faut pas en être surpris : ce sont eux qui ont eu la charge d'établir les échelles de référence. Même l'échelle du temps atomique, qui repose sur des appareils de laboratoires réalisés par des physiciens et qui ne doit rien à l'astronomie, a été établie principalement par des astronomes. C'est aussi en astronomie, pour la dynamique du système solaire, que la qualité des échelles de temps est la plus critique et même que l'on trouve, avec les mesures des périodes des pulsars, le plus grand besoin d'exactitude de l'unité de temps.

Les mots "échelle", "jalon" sont inspirés par une transposition dans l'espace. Curieusement, cependant, il n'y a pas d'équivalent dans les mesures dimensionnelles. Il n'apparaît, en effet, ni besoin, ni possibilité de se localiser avec précision dans un espace infini — ou, du moins, à la dimension de l'univers que l'on connaît — et les astronomes se satisfont de mesures de distances. Il ne se passe guère d'événements qui sont caractérisés par une région particulière de l'espace où nous entraîne le Soleil ou la Galaxie. Mais le temps contient toute la richesse de notre passé. Si l'on se borne à l'astronomie et à un passé "récent", il y a des observations s'étendant sur plusieurs millénaires dont la date (date et "heure") nous reste précieuse.

Il y a cependant un domaine des mesures dans l'espace où l'on trouve des problèmes très voisins de ceux que posent les échelles de temps : c'est celui des mesures angulaires, plus précisément la définition et la réalisation d'un référentiel non-tournant. Comme le temps, le mouvement cyclique des astres se déroule indéfiniment, il peut être mesuré avec précision, et il l'a été depuis fort longtemps. La parenté avec le temps est évidente : tour à tour, le mouvement des astres a été le temps, ou bien un objet d'étude en fonction d'une autre mesure du temps. Dans la science moderne, il y a une évolution presque identique des idées, pour l'établissement d'échelles de temps et la réalisation d'un référentiel non tournant. J'en parlerai ultérieurement.

### Temps et mesure du temps

La nature du temps nous étant toujours inconnue, on peut d'abord se demander si l'on peut mesurer une grandeur sans la définir. Voyons ce qu'en pensent un certain nombre de savants.

Il semble que chez les anciens il n'y ait d'abord pas eu de distinction entre le concept de temps et sa mesure astronomique, c'est-à-dire le mouvement des astres.

"les événements n'étaient pas dans le temps, ils étaient le temps", écrit Ariotti (1980). Dans l'antiquité grecque, les réflexions sur le temps lui-même ont commencé avec Platon, puis Aristote. Elles n'ont pas cessé depuis et il n'est guère de philosophe qui n'ait pas fait part de ses réflexions à ce sujet. Il existe même de nos jours une société active, "The International Society for the Study of Time", fondée par J.T. Fraser en 1966, qui se propose de cerner le concept de temps. Cette société s'est voulue multidisciplinaire. Mais, il est typique de constater que les responsables de système de mesure du temps ne se soient guère intéressés à ses travaux.

La notion du temps qui s'écoule est parfois évoquée par les astronomes non sans une poésie naïve :

"on peut comparer le temps à un grand cours d'eau fuyant toujours et toujours" (Fleming , 1884).

Mais la plupart d'entre eux éludent le problème de la définition du temps.

"Du reste, ils [les calculateurs d'éphémérides] ne se sont jamais inquiétés des variations philosophiques touchant la définition et la nature du temps. On ne définit logiquement ni la longueur, ni l'aire, ni le volume (...); pour le savant, il suffit que ce soient des grandeurs mesurables" (Danjon, 1929).

Un peu plus loin, dans le même texte on trouve

"La définition expérimentale du temps a donc gain de cause".

D'autres auteurs écrivent :

"En astronomie nous ne sommes pas concernés par la question fuyante de définir le temps, mais seulement par le problème concret de mesurer le temps" (Woolard et Clemence, 1966, traduction).

Dans ces phrases, on sent même quelque mépris pour les considérations métaphysiques (à moins que ce ne soit quelque inconfort !). Cependant, il y a au moins une exception récente. J.E. Gibbs écrit en 1977 :

"Une définition du temps, ou au moins d'une échelle de temps, est nécessaire comme le fondement logique pour la construction d'une telle échelle dans un laboratoire de métrologie" (traduction).

Gibbs essaye ensuite une conception du temps comme l'ensemble des événements de l'univers (à rapprocher de la citation antérieure d'Ariotti) et lui applique la théorie des ensembles. Ces travaux n'ont pas donné lieu à des conséquences pratiques.

L'attitude des fondateurs de théories est intéressante. Newton a réfléchi sur le temps :

"Le temps absolu, véritable et mathématique, s'écoule uniformément, de lui-même et du fait de sa propre nature, sans aucune relation extérieure".

Réflexion jugée vivement par Danjon (1929) :

"Newton s'est efforcé de concevoir un temps idéal, sans aucun lien avec le monde matériel, mais sa conception est restée stérile et il a fallu, après deux siècles, descendre des nuées (...)", Danjon, 1929.

Einstein, plus empiriste, n'a guère été troublé par des concepts des grandeurs de la physique : la physique peut seulement parler des grandeurs susceptibles d'être mesurées.

Donc, d'une façon quasi-générale, on se passe d'une définition du temps. On se passe également de la définition d'une échelle de temps. A part Gibbs, déjà cité, référence est souvent faite d'une façon très vague au "temps uniforme"

"une mesure de l'écoulement uniforme idéal du temps qui est intuitivement conçue d'après l'expérience du monde physique", (Woolard et Clemence, 1966).

Tout ceci montre que l'attitude du métrologue est pragmatique — vis-à-vis du temps comme des autres grandeurs. Avec ce que la nature lui offre, il construit un système de mesures de sorte qu'il "aille" le mieux possible, qu'il permette le mieux possible de faire des modèles des phénomènes qu'on observe et des prévisions à partir de ces modèles.

"Le temps est défini de façon que le mouvement paraisse simple. (...) De bonnes horloges font apparaître comme droites les trajectoires dans l'espace-temps de particules libres" (Missner, Thorne, Wheeler, 1973).

Souvent la réflexion sur la mesure du temps suit l'établissement d'un système de mesure, elle a un caractère historique plutôt que constructif.

#### Deux modes de mesure du temps

Une clé pour comprendre les systèmes de mesure du temps est d'approfondir la notion de temps uniforme.

Une première idée que l'on peut avoir, c'est qu'un même phénomène physique reproduit dans les mêmes conditions (sauf la date !) doit avoir la même durée. C'est une conception intuitive, naturelle, ou empirique, le choix de l'adjectif reflétant le degré d'appréciation de son utilisateur. Mais ces adjectifs expriment tous clairement la principale caractéristique de la méthode. Elle ne demande aucune théorie. Elle est seulement justifiée par la constatation que, dans la limite de précision de nos mesures, les rapports entre les durées de divers phénomènes reproductibles restent constants. Bien entendu on peut construire une échelle de temps réputée uniforme par le cumul indéfini des durées étalon. Cette façon d'opérer est à rapprocher de la conception cyclique du temps des philosophes.

Mais on peut penser aussi à une méthode qui consiste à supposer vraie une théorie dynamique : la mécanique de Newton, par exemple. Le principe d'inertie nous dit qu'un point matériel isolé a un mouvement rectiligne et uniforme. L'expérience est difficile à monter ! Mais si l'on y parvient, on réussit à transposer une mesure de temps (uniforme par définition) en une mesure dimensionnelle. Cette méthode dynamique ne prend de valeur pratique que dans les mouvements astronomiques : rotation des astres (Terre, pulsars, ...) mouvements orbitaux dans le système solaire. Au fait que ces mouvements dépendent de forces bien connues (les dissipations étant très faibles) il s'ajoute l'intérêt qu'ils sont quasi-périodiques, ce qui permet une mesure sans dégradation comme celle qui serait due, par exemple, à un éloignement indéfini de l'objet observé. Mais on ne présuppose pas une périodicité parfaite : éventuellement, on la démontre à partir des axiomes de la théorie. Dans cette méthode, en dépit des apparences, le temps est conçu comme linéaire.

Je voudrais maintenant montrer l'usage que l'on a fait de ces méthodes et rapporter quelques-unes des réflexions qu'elles ont suscitées.

Le passage au temps de la dynamique

Que la durée du jour ait été prise comme étalon naturel de durée cela est bien évident. Inutile ici de citer les anciens

"qui ont eu des idées justes sur toutes choses"

comme écrivait Janssen (1886). Je ne m'étends pas non plus sur les inégalités saisonnières du jour solaire, connues dès l'antiquité grecque et que l'on a corrigées pour définir le temps solaire moyen.

Deux faits sont étonnants. D'abord, après qu'Euler ait démontré que la rotation de la Terre était uniforme, le temps solaire moyen prenait un caractère de temps dynamique. Mais il ne semble pas que cela ait été reconnu. Il en eut été autrement si, par exemple, la théorie avait révélé une accélération, même faible, mais elle a simplement justifié la confiance que l'on avait dans la régularité de la rotation terrestre : la confiance est restée.

Le deuxième fait étonnant est que les quelques doutes émis sur l'uniformité de la rotation terrestre n'ont eu qu'un faible écho. Pourtant, Flamsteed, en 1677, à la fondation de l'Observatoire Royal de Greenwich, a voulu vérifier cette uniformité érigée en dogme par les Coperniciens, à l'aide de pendules — il a été rassuré (voir Howes, 1980). Plus tard (1752) l'Académie des Sciences et Belles Lettres de Berlin, présidée par Maupertuis, posait la question

"Le mouvement diurne de la Terre a-t-il été de tous temps de la même rapidité ou non ? Par quels moyens peut-on s'en assurer ? Et, au cas qu'il y ait quelque inégalité, quelle en est la cause ?".

Dans sa réponse Kant invoquait un ralentissement possible de la dissipation d'énergie dans les marées. Cette idée était juste, mais elle ne fut confirmée que deux siècles plus tard. En 1825 Laplace écrivait



"Il est donc certain que depuis Hipparque la durée du jour n'a pas varié d'un centième de seconde [centésimale]",

ce qui est inexact, la durée du jour croissant, en moyenne de 0,002 seconde (d'heure) par siècle (une seconde centésimale équivaut à 0,864 seconde d'heure).

En 1864 Ferrel, puis en 1865 Delaunay, soutenaient que les écarts observés entre les éphémérides lunaires et les observations étaient dus à l'allongement de la durée du jour, mais en 1884 Fleming écrivait

"Il n'est point de mouvement plus uniforme que celui de la Terre sur son axe. Cette révolution journalière est susceptible de la mesure la plus minutieuse et constitue sous tous les rapports l'unité de mesure la plus propice."

En 1892 Tisserand avait tout en mains, par les discordances entre les éphémérides de la Lune et les positions observées pour évaluer les irrégularités de la rotation terrestre, mais il répugnait à toucher à la base de la mesure du temps.

Cela montre combien l'attachement à l'heure solaire a des racines profondes. Même l'adoption d'une heure qui ne soit pas celle de son méridien soulevait des antagonismes :

"l'heure locale qui est pour chaque lieu l'expression au moins très approchée du cours des phénomènes naturels, éternels régulateurs de vie, ne pourra jamais disparaître" (Janssen, 1886).

Récemment, les discussions sur l'adoption du temps atomique ont soulevé l'objection qu'on ne pouvait pas abandonner le temps solaire moyen parce que

"c'est le temps de Dieu".

Ainsi, le passage pour des usages scientifiques seulement (car l'unification mondiale de l'heure repose encore sur une forme du temps solaire moyen) à une mesure du temps fournie par une théorie dynamique a été très lent — près d'un siècle a été nécessaire. Finalement, on a adopté vers 1950, pour réaliser un temps dynamique, une expression de la longitude du Soleil en fonction du temps établie par Newcomb à la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Il a fallu, certes, de longues vérifications pour s'assurer de la réalité des irrégularités de la rotation terrestre. Mais il a fallu aussi s'accoutumer à une idée nouvelle. A cet égard, je vais citer des extraits d'un texte de Danjon (1929) qui est remarquable à la fois par son enthousiasme et ses réserves

"Ayant à choisir entre la constante de la rotation de la Terre et la validité de la loi de Newton, l'astronome ne peut hésiter, il sacrifie la première. Il ne saurait, sans nécessité absolue, admettre la moindre infraction à la loi de Newton, non que celle-ci ait la valeur d'un dogme divin, mais comment accepter qu'elle soit à la fois vraie, dans les mille conséquences qu'on en a tirées et qui se sont dûment vérifiées, et fausse sur un point d'ailleurs susceptible d'une autre explication beaucoup plus simple ? Il est beaucoup plus simple en effet de supposer que la Terre ne tourne pas uniformément (les explications de ce fait ne manquent pas, nous le verrons) que de supposer une action commune et inconnue agissant sur les corps du système solaire pour les faire avancer ou retarder tous ensemble. (...) La loi de Newton est sauvée, mais il lui arrive une aventure singulière ; appelée désormais à donner la mesure du temps, elle devient en partie invérifiable et elle cesse d'être à proprement parler une loi. (...) [La situation est] paradoxale, puisque c'est en cherchant à donner une solide base expérimentale à la notion de temps que nous sommes conduits à ôter partiellement ce même caractère expérimental à l'une des lois fondamentales de l'Astronomie. Il en est souvent ainsi dans les oeuvres humaines. A vouloir trop bien faire, on perd d'un côté ce qu'on gagne de l'autre, et sans une foi bien vive dans l'idéal, on

se laisserait de remuer toujours le rocher de Sisyphe. Bornons-nous à souhaiter qu'on découvre un jour un bon étalon terrestre de temps, et laissons là ces difficultés de pure logique, puisqu'aussi bien nous sommes rassurés sur leurs répercussions pratiques."

Mais les faibles réticences de Danjon se sont évanouies pour la plupart des astronomes. Finalement convaincus, le temps dynamique leur apparut comme un progrès définitif. Les textes suivants empruntés à Woolard et Clemence ont été publiés en 1966.

"Pour les besoins scientifiques modernes un système satisfaisant [de mesure du temps] ne peut être établi que sur une base théorique critique et complète. (...) La pratique traditionnelle de la mesure du temps par le mouvement apparent des astres peut maintenant reposer sur des fondations dynamiques exactes en adoptant comme étalon primaire la mesure du temps implicitement définie par les lois du mouvement." [traduction]

Je souligne le mot "exact" qui fait penser à Jules Verne ! Voilà des phrases bien définitives, alors que les étalons atomiques de temps à jet de césium, fonctionnels, étaient en service depuis 1955 !

#### Le passage au temps atomique

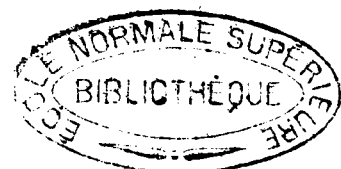
Avec ces étalons atomiques commence une nouvelle ère. Les instruments recueillant la fréquence liée aux transitions atomiques. Une durée étalon est réalisée par un décompte de périodes correspondantes : à nouveau, nous avons un étalon naturel de durée comme l'était le jour jadis. Je ne veux pas, dans cette conférence, entrer dans des détails techniques. Il suffit de dire que les étalons atomiques de temps sont maintenant des instruments tout à fait courants mais je voudrais donner des ordres de grandeur des améliorations apportées par les divers modes de mesure du temps.

Avec la rotation terrestre, une durée pouvait être mesurée avec une incertitude de  $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  au mieux, en valeur relative, cette incertitude correspondant aux fluctuations de l'étalon de mesure. Avec le temps dynamique choisi par les astronomes (le Temps des Ephémérides), cette incertitude est réduite à environ  $5 \times 10^{-9}$ , soit une amélioration d'un facteur de l'ordre de 10. Les étalons atomiques progressent : l'incertitude pour le premier étalon à césium (1955) était de l'ordre de  $10^{-9}$ . Pour les meilleurs des divers étalons construits par la suite, les incertitudes étaient réduites à  $10^{-10}$  en 1960,  $10^{-12}$  en 1967,  $10^{-13}$  à  $10^{-14}$  maintenant. Ce gain d'exactitude sur les mesures de durées est donc maintenant d'un million, par rapport à ce que donnait la rotation terrestre et de  $10^5$  par rapport aux mesures dynamiques du temps.

Au niveau actuel de la qualité du temps atomique, on peut considérer qu'il est peu probable d'observer un décalage de 1 ms en 1000 ans par rapport au temps atomique idéal, conforme à sa définition. Cette erreur est négligeable vis-à-vis des erreurs commises dans l'observation du mouvement des astres (sauf pour les mesures de périodes de pulsars). On pourrait s'attendre à l'enthousiasme des utilisateurs scientifiques (les techniciens ont su tout de suite tirer parti des possibilités offertes). Qu'en est-il ?

En ce qui concerne les physiciens, principalement, sinon uniquement, intéressés par les mesures de durées et de fréquences, le temps dynamique les a laissés perplexes, mais ils s'en sont pratiquement passé en sautant directement du temps solaire moyen au temps atomique (l'intermède de la seconde dynamique "la seconde des éphémérides", officiellement seconde du système international d'unités de 1960 à 1967, a été d'une brièveté remarquable). La possibilité d'avoir dans son laboratoire immédiatement et commodément son étalon de durée est unanimement appréciée.

Les réactions des astronomes sont beaucoup plus complexes.



Danjon, dans le passage déjà cité espérait un

"bon étalon terrestre de temps".

Il n'est donc pas surprenant qu'il ait tout de suite apprécié (avec quelques autres astronomes, en particulier, W. Markovitz, H.M. Smith, N. Stoyko) les étalons atomiques de temps :

"[Il] se réjouit, en tant qu'astronome, des progrès dont bénéficient les étalons physiques de temps qui permettront sans doute la découverte de phénomènes encore inconnus" (CCDS, 1957).

Mais bien plus tard d'autres astronomes expriment encore leurs réserves :

".. Une horloge atomique procure seulement un étalon de fréquence ; elle détermine une unité de temps, mais non pas le décompte des unités qui est nécessaire pour déterminer l'intervalle écoulé depuis n'importe quelle époque initiale du passé. Les déterminations astronomiques du temps sont essentielles pour définir une époque [origine] et référer les instants à elle, car aucune horloge artificielle ne peut être maintenue indéfiniment en opération continue, à la façon des mouvements célestes." (Woolard et Clemence, 1966) [traduction].

Evidemment, le temps atomique n'est pas disponible avant 1955. Mais on peut être rassuré sur sa continuité. Il existe des moyens de faire coopérer à la construction d'une échelle de temps atomique un grand nombre d'étalons répartis sur toute la Terre, de sorte que la probabilité de "perdre l'heure" est extrêmement réduite. Les organismes internationaux se sont accordés (officiellement en 1971, en pratique avant) sur une échelle unique qui a pris le nom de Temps Atomique International.

Malgré cela, le temps atomique n'est pas bien accepté chez les dynamiciens du système solaire. Ce n'est pas à cause de la différence relativiste entre le temps propre de nos horloges et les temps-coordonnées des théories dynamiques : les conversions semblent peu discutables à l'approximation requise. La réticence n'est pas due non plus aux défauts de réalisation du temps atomique — c'est-à-dire à son écart par rapport à un temps atomique idéal, strictement basé sur la définition de la seconde — ces défauts restent négligeables. La réticence pourrait être due en partie à l'idée qu'il existe une différence de nature entre le temps des phénomènes macroscopiques (de la dynamique) et le temps des phénomènes quantiques.

"Mon attention est attirée [par S. Aoki et T. Fukushima] sur l'autre point, plus fondamental ... c'est la distinction entre le temps dynamique et le temps atomique. Je veux dire que le temps dynamique est un concept appartenant à la physique de l'espace-temps et que le temps atomique [appartient] à la mécanique quantique." (M.-K. Fujimoto, correspondance) [traduction].

Plus vraisemblablement, il y a une tendance à considérer qu'une théorie mécanique appliquée au système solaire aboutit à une éphéméride (numérique) qui définit implicitement ses références de temps et aussi d'espace. On peut ensuite demander à l'observation si ces références s'accordent ou non aux références que l'on peut réaliser : temps atomique, système de références angulaires attaché aux étoiles ou aux sources extragalactiques. Il est loin de se faire une unanimité sur le point de vue que le temps atomique étant quasi-idéal (à l'approximation requise), sa possible divergence avec le temps des équations dynamiques (pour le moment on n'a pas de raisons expérimentales de rejeter l'identité) devrait être incluse dans la théorie.

L'orientation d'un référentiel dans l'espace : mêmes solutions

J'ai mentionné, au début de cette conférence que l'orientation d'un référentiel dans l'espace soulevait des problèmes analogues à l'établissement d'une référence temporelle.

Initialement, cette référence fut aussi purement naturelle, les directions des étoiles étant supposées fixes. Durée du jour solaire moyen et direction des étoiles étaient la base même des références de la dynamique. Mais, après la découverte et la mesure des mouvements propres au 18<sup>e</sup> siècle, il a fallu apporter quelques "correctifs" à cette conception naturelle : traitement statistique des mouvements propres, puis, en 1930, inclusion d'un modèle de rotation galactique dans ce traitement statistique.

Mais en même temps qu'on adoptait une mesure du temps par la dynamique, en 1950, apparaissaient les premières tentatives de fixer aussi l'orientation des références d'espace par la dynamique. L'éphéméride supposée exacte d'une planète, de la Lune ou du Soleil donne une relation (numérique) entre sa direction, rapportée à un système sans rotation, implicite dans la théorie, et le temps, paramètre de cette théorie. On a vu comment on pouvait avoir ainsi le temps — mais en supposant que le référentiel d'espace préexistait. Comment peut-on aussi faire fonctionner cette méthode en sens inverse et obtenir le référentiel d'espace ? Ce serait impossible si la Terre était la seule à graviter autour du Soleil. Mais dans le cortège des astres du système solaire, on peut avoir recours à des effets relatifs (perturbations) et aussi à des mesures de distance. Le problème est déterminé, on peut avoir par les méthodes dynamiques le temps et l'orientation d'un système d'inertie.

Depuis les premiers travaux de 1950, les astronomes ont procédé à de nombreuses déterminations de ce qu'ils appellent "l'équinoxe dynamique", en particulier lors de la construction d'éphémérides très précises, par intégration numérique, en préparation aux explorations interplanétaires.

Cependant, le système de référence spatial dynamique n'est jamais devenu "officiel". Conventionnellement les astronomes s'en sont tenus aux analyses de mouvements propres, c'est-à-dire à la méthode naturelle améliorée par la statistique.

Le retour aux références spatiales naturelles pures et simples est en cours de réalisation, car il existe maintenant une méthode très précise pour mesurer la direction des astres les plus lointains de l'univers que l'on connaisse, les quasars. On peut admettre à priori que ces astres ont des mouvements apparents angulaires tout à fait négligeables.

Le problème de l'orientation des références spatiales n'a pas la même envergure que la mesure du temps : il n'intéresse que les astronomes. Mais jusqu'à une époque très récente, c'est-à-dire vers 1960-1970, les astronomes ont été les seuls à traiter l'ensemble des références d'espace et de temps. Il n'est donc pas très surprenant qu'ils aient utilisé pour l'espace ce qui semblait avoir si bien réussi pour le temps.

### Conclusions

On peut penser que des références métrologiques, comme un étalon de durée ou une échelle de temps, doivent être aussi "naturelles" (ou "intuitives", ou "empiriques") que possible. En effet, parmi les multiples emplois de ces références, le plus noble consiste à éprouver par la mesure la théorie que l'on a appliquée à un phénomène : il serait fâcheux qu'on ait des doutes sur les théories sous-jacentes aux références mêmes. En disant cela, j'exprime une vue personnelle : je n'ai pas trouvé de discussion à ce sujet. Mais il semble que la recherche de références "naturelles" ait été implicitement à la base de la métrologie : mètre défini à partir du méridien terrestre, puis des longueurs d'onde, références thermométriques par des points triples, etc.



Mais le contrepoint de cette proposition est qu'il faut aussi que la référence soit d'une qualité métrologique telle qu'elle puisse être utilisée dans tous les cas (si possible), sans apporter de "bruit" indésirable.

Pour la mesure du temps, on n'a pas pu satisfaire simultanément ces deux conditions avant l'apparition du temps atomique. L'aspect pratique a prévalu et parti d'une référence naturelle (le jour ou la rotation terrestre), on est revenu à une autre référence naturelle (la fréquence associée à des transitions atomiques), après une incursion dans les méthodes de la dynamique qui ont été momentanément plus efficaces.

Mais ce cycle ne s'est pas accompli aisément, peut-être, justement parce qu'il impliquait des changements trop profonds des concepts.

J'ai souligné la grande lenteur du passage aux temps de la dynamique et je l'ai expliquée par la nécessité de difficiles vérifications et par l'attachement au cycle des jours et des nuits. Il faut peut-être ajouter à ces explications une réticence non exprimée à abandonner un étalon naturel au profit d'une référence dépendant d'une théorie.

L'adoption de l'étalon atomique de temps, à la fois "naturel", précis et exact a été au contraire très rapide : 1955, premier étalon à césium ; 1967, définition atomique de la seconde ; 1971, reconnaissance du Temps Atomique International par la Conférence Générale des Poids et Mesures. Ce sont là, pour la métrologie officielle qui est assez conservatrice, des dates rapprochées. Le temps atomique sert à tout le monde, au public comme aux physiciens, comme à ceux qui calculent des orbites de satellites artificiels ou de sondes spatiales ... mais il place dans l'embarras les astronomes qui s'occupent de la dynamique du système solaire.

Les astronomes sont fortement enclins à penser maintenant que le temps qui leur importe est celui qui est implicite dans la théorie dynamique qu'ils utilisent et les éphémérides qui en résultent. Ils étendent de plus, comme je viens de le montrer, cette conception aux paramètres qui orientent leur système de référence dans l'espace. La théorie et l'éphéméride forment ainsi un bloc où la logique ne trouve aucune faille et qui est apparemment isolé des contraintes métrologiques.

Cependant, il y a des points de contact avec des références extérieures à ce bloc : pour fixer les conditions initiales et, tout simplement pour utiliser les éphémérides, soit à des fins pratiques (navigation interplanétaire, par exemple), soit pour éprouver théories ou références.

Les rapports entre les références implicites des théories dynamiques et les références qui leur sont extérieures sont loin d'être clarifiés. On en discute depuis 1971 au sein de divers groupes de travail qui ont produit des rapports unanimement reconnus ambigus. D'un commun accord, bien que nul ne soit satisfait, les discussions ont été provisoirement suspendues pour laisser les idées évoluer par maturation ou renouvellement des protagonistes.

#### Références

1. Ariotti, P.E., 1980, The concept of time in Western Antiquity, in "The Study of Time II", Springer-Verlag.
2. Danjon, A., 1929, Le Temps, sa définition pratique, sa mesure, Bull. Soc. Astron. de France, jan.-mars 1929.
3. Fleming, S., 1884. La citation est extraite des Procès-Verbaux de la Conférence internationale tenue à Washington pour l'adoption d'un méridien unique et d'une heure universelle.

4. Gibbs, J.E., 1977, Towards a definition of time, National Physical Laboratory (U.K.), DES Memorandum No. 25.
  5. Howse, D., 1980, Greenwich time and the discovery of the longitude, Oxford University Press.
  6. Janssen, J., 1886, Notice sur le méridien et l'heure universels, Annuaire du Bureau des Longitudes, 1886.
  7. Misner, C.W., Thorne, K.S., Wheeler, J.A., 1973, Gravitation, Freeman and Co.
  8. Newton, I., 1687, Philosophiae naturalis principia mathematica.
  9. Woolard, E.W., and Clemence, G.M., 1966, Spherical Astronomy, Academic Press.
-