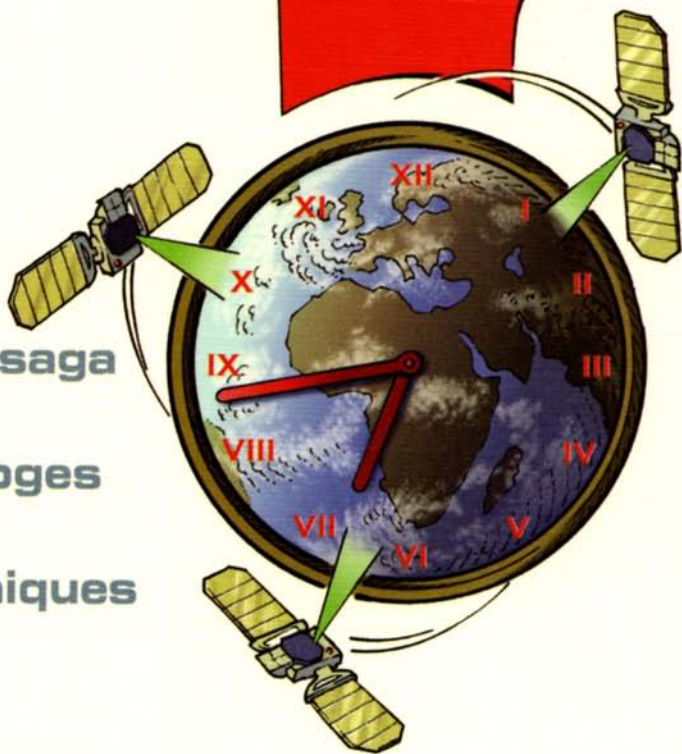


Tony Jones

# Combien dure une seconde ?

La saga  
des horloges  
atomiques



Tony Jones

# **Combien dure une seconde ?**

**La saga des horloges atomiques**

Traduit de l'anglais  
par Alain Milsztajn

Préface  
d'Alain Milsztajn



17, avenue du Hoggar  
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

**« Bulles de sciences »**  
**Collection dirigée par Bénédicte Leclercq**

**Ouvrages déjà parus :**

*La Terre chauffe-t-elle ?* Gérard Lambert  
*Asymétrie, la beauté du diable,* Frank Close  
*Que sait-on des maladies à prions ?* Émile Desfeux  
*Des séquoias dans les étoiles,* Philippe Chomaz  
*Les neutrinos vont-ils au paradis ?* François Vannucci  
*Les requins sont-ils des fossiles vivants ?* Gilles Cuny  
*Combien pèse un nuage ?* Jean-Pierre Chalon  
*Pourquoi la Nature s'engourdit ?* Jean Générmont et Catherine Perrin  
*Qu'est-ce qui fait trembler la Terre ?* Pascal Bernard

**À paraître :**

*À quoi ressemble Superman ?* Roland Lehoucq  
*Un caillou peut-il menacer notre monde ?* Christian Köberl

En couverture : Illustration originale de Thomas Haessig

Édition originale :

*Splitting the Second : the story of Atomic Time,* Tony Jones,  
© 2000 IOP Publishing Ltd, Originally published in English by Institute of  
Physics Publishing Ltd, Dirac House, Temple Back, Bristol BS1 6BE, England.  
First published 2000.

ISBN : 2-86883-628-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2003.

## Préface

*Ding, ding, ding, ding !  
Et encore ding, ding, ding !  
Je ne peux plus m'arrêter de sonner !  
Je ne sais plus l'heure qu'il est !  
Il m'a ôté mon balancier !  
J'ai d'affreuses douleurs de ventre !  
J'ai un courant d'air dans mon centre !  
Et je commence à divaguer !*

L'Horloge comtoise, dans  
*L'Enfant et les Sortilèges*  
Livret de Colette  
Musique de Maurice Ravel  
(Éditions Durand SA, Paris, 1925)

Les horloges atomiques sont de plus en plus présentes dans notre vie même si, la plupart du temps, nous ne sommes pas conscients du rôle qu'elles y jouent. Nous savons bien que ces horloges existent et qu'elles sont à la base du « Temps universel coordonné », qui permet de définir l'heure légale dans chaque pays. Mais, dans la pratique, combien d'horloges faut-il pour fabriquer cette « heure officielle » ? Où sont-elles situées et comment fonctionnent-elles ? Comment les compare-t-on, comment les combine-t-on ? Quelle en est la précision ? Et, finalement, à quoi bon une telle précision ? Qui a *vraiment* besoin d'horloges atomiques ?

C'est cela que le livre de Tony Jones nous raconte et nous apprend, avec précision, sans sécheresse et souvent avec humour. À ma connaissance, il s'agit du premier ouvrage qui expose l'histoire du temps atomique sans viser un public restreint de spécialistes. Tout au long de ce livre, vous découvrirez les applications parfois surprenantes des horloges atomiques, des plus étonnamment banales, comme la localisation des coups de foudre ou des incidents sur les lignes à haute tension, aux plus complexes, comme la mesure directe de la vitesse avec laquelle la Lune s'éloigne régulièrement de la Terre.

Tout le monde a entendu parler du système de positionnement par GPS qui est de plus en plus utilisé par les particuliers, par exemple les randonneurs ou les navigateurs, ou bien par des entreprises, comme la RATP qui localise ses bus à l'aide du GPS. Demain, le trafic aérien – atterrissage et décollage compris – sera peut-être géré à l'aide du GPS ou d'un système analogue. Toutes ces applications n'existeraient pas aujourd'hui sans la combinaison de la précision des horloges atomiques, de l'ordre de quelques milliardièmes de seconde, et de leur mise en orbite à bord de plusieurs dizaines de satellites. Notons au passage qu'il faut pour cela tenir compte de la théorie de la relativité, qui prédit que l'écoulement du temps mesuré par une horloge dépend de sa vitesse et de son altitude. La comparaison des horloges satellitaires et terrestres le démontre d'ailleurs amplement. Avec ce système de positionnement, on n'en est plus à vérifier la relativité ; on s'en sert dans des objets d'usage courant !

Pour bien apprécier cette révolution, il faut savoir pourquoi les horloges atomiques sont si précises et comment elles en sont venues à remplacer les corps célestes dans la mesure du temps. Là encore, le récit de Tony Jones est très instructif, car la « prise de pouvoir » sur le temps par les physiciens n'a pas été sans frictions entre les astronomes et eux : il est toujours passionnant d'étudier,

## PRÉFACE

avec le recul du temps (sans jeu de mots !), l'émergence d'une nouvelle technique, sa réception par les diverses communautés, ainsi que les résistances justifiées ou non qu'elle suscite. Il s'agit vraiment ici d'un cas de figure, dont je suis sûr qu'on pourrait le « décalquer » sur de nombreuses autres révolutions techniques ou scientifiques. La « seconde des physiciens » est aujourd'hui tellement stable qu'elle permet d'étudier en détail les irrégularités de la rotation terrestre – voire même la dérive des continents et donc des observatoires astronomiques (quelques centimètres par an). Cela montre que l'astronomie a aussi largement bénéficié de cette évolution inévitable.

Toute évolution produit des fossiles, mais le passage au temps atomique en a fabriqué un particulièrement coriace, l'heure de Greenwich ou GMT. Comme le système horaire ne dépend plus directement du passage de certaines étoiles par le méridien de Greenwich, l'heure GMT aurait normalement dû disparaître voici plusieurs dizaines d'années, pour faire place au Temps universel coordonné. Comme on peut le constater tous les jours, l'usage commun n'a pas suivi les recommandations de la Conférence Générale des Poids et Mesures ! Je vous laisse découvrir la façon dont Tony Jones nous raconte avec beaucoup d'humour comment les choses se sont passées au Royaume-Uni.

Il est des révolutions « temporelles » qui marquent l'histoire, et d'autres qui passent presque inaperçues. Dans la première catégorie, on trouve la réforme du calendrier julien et celle du calendrier grégorien. Toutes deux avaient comme but – identique – d'adapter la durée de l'année *civile* (le nombre moyen de jours par an) à la durée de l'année *tropicque*, c'est-à-dire celle qui ramène les saisons, et les fêtes religieuses, à date fixe. Dans la catégorie des réformes méconnues, on trouve un seul exemple, celui des « secondes intercalaires ». Il vous est peut-être arrivé de lire vers la fin d'un mois de décembre dans votre quotidien favori que

d'obscurs scientifiques avaient décidé que le 31 décembre prochain comporterait une seconde de plus (la dernière remonte au 31 décembre 1998). Cela prouve déjà que nous n'en sommes plus à ajuster le nombre de jours par an, mais bien *le nombre de secondes par an*, ce qui donne la mesure des progrès accomplis. Qui sont ces scientifiques, et qui leur a donné ce pouvoir d'agir à leur gré sur la durée de l'année ? Pourquoi cet ajout est-il si irrégulier qu'on doive réexaminer la question tous les six mois ? Peut-être est-ce cette irrégularité qui a empêché la « révolution » des secondes intercalaires d'acquérir la même notoriété que ses aînées ? Ou bien est-ce dû à la durée minimale de l'ajustement ? Il faut bien reconnaître qu'une seconde de plus ou de moins, ça vous a moins d'allure qu'un 29 février tous les quatre ans ; mais, tout de même, une minute de 61 secondes, voilà qui n'est pas ordinaire ! À moins tout bonnement que cette réforme ne demeure méconnue parce qu'on ne peut lui associer le nom d'une seule personne. Jules César et Grégoire XIII, à défaut d'avoir été les promoteurs scientifiques de leurs réformes, en ont été les « décideurs » politiques, ce qui fait que leurs noms y sont restés attachés... et que peu de gens connaissent Sosigène, l'astronome d'Alexandrie « consultant » de Jules César, et Clavius, l'un de ses homologues grégorien. Rien de tel pour les secondes intercalaires : pas de décideur unique, pas de savant unique. Mais, quelle que soit la raison de notre méconnaissance de cette réforme, nous avons ici une occasion de la combler grâce à ce livre.

Que l'on me permette, pour finir, d'évoquer un souvenir personnel. Lors d'un des premiers cours de physique auquel j'assistais, je suis littéralement tombé en arrêt devant la nouvelle définition de la seconde, qui datait à peine de deux ans : « *La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.* » Que pouvait bien vouloir dire tout ce

## PRÉFACE

jargon ? Pourquoi 9 192 631 770 périodes ? Pourquoi le césium ? Qu'est-ce qu'un état fondamental ? Et un niveau hyperfin ? Même s'il me fallut un certain nombre d'années avant d'être en mesure de comprendre la réponse à ces questions, je me mis tout de même, à l'époque, à consulter diverses encyclopédies pour essayer d'en savoir un peu plus. Et ce qui devait arriver arriva : la définition de la seconde atomique était trop récente, et je ne pus dénicher... que de longues explications sur le temps des éphémérides et la durée de l'année tropique en 1900 (soit dit en passant, je fus un peu surpris de l'existence d'un 0 janvier 1900). Cela m'apprit au moins deux choses : la science peut évoluer à vue d'œil, et même la définition de ses unités de mesure – ses « dix commandements » – est susceptible de changer sur une brève échelle de temps.

Je dois aujourd'hui à ce livre l'essentiel de mes connaissances sur l'histoire récente de la mesure du temps, et j'ai enfin compris pourquoi le balancier doit céder la place au jet de césium (que je me plais à considérer comme un moderne avatar du « *courant d'air dans son centre* » de Colette). J'ai donc pris beaucoup de plaisir à le lire, le relire pour finalement le traduire. J'espère sincèrement que vous partagerez ce plaisir.

*Alain Milstajn*





## Introduction

Au mur de mon bureau, il y a une horloge radio-pilotée. Ce n'est au fond qu'une banale horloge à quartz reliée à un minuscule récepteur radio. Toutes les deux heures, elle se met à l'écoute des impulsions diffusées régulièrement par un émetteur radio asservi sur les horloges atomiques du *National Physical Laboratory* britannique, ce qui lui permet de se recalibrer sur le Temps Universel Coordonné (couramment dénommé Heure de Greenwich, ou GMT – à tort comme nous allons le voir plus loin). Ce n'est pas tout : elle prend aussi automatiquement en compte le passage à l'heure d'été et le retour à l'heure d'hiver, et elle est même capable de gérer les secondes intercalaires, encore que pas de la façon la plus élégante qui soit. Je n'ai donc plus jamais besoin, pour connaître l'heure exacte, d'attendre les tops horaires diffusés chaque heure à la radio, ou d'appeler l'horloge parlante. Mon horloge donne une heure « garantie », à une fraction de seconde près, même si je n'ai pas vraiment l'usage d'une telle précision.

De telles horloges sont aujourd'hui chose courante, et cela traduit bien les bouleversements qu'a connus la mesure du temps au XX<sup>e</sup> siècle. On peut même légitimement parler de révolution. Au début de ce siècle, la mesure du temps était contrôlée – depuis des millénaires – par les astronomes. À la fin du même siècle, le contrôle était passé aux physiciens, bien que les astronomes continuent à y

jouer un rôle, moindre. S'il fallait dater ce bouleversement, on pourrait en situer le début en 1955, avec le premier fonctionnement en continu d'une horloge atomique, et la fin en 1967, avec le remplacement officiel de la seconde astronomique par la seconde atomique dans le Système International d'Unités.

Nous sommes au début du XXI<sup>e</sup> siècle, et le moment semble opportun pour raconter cette histoire à un large public. Le *National Physical Laboratory* (laboratoire national de métrologie du Royaume-Uni), qui vient de fêter son premier centenaire, y a joué un rôle capital, ce qui lui a conféré le droit en quelque sorte « naturel » d'être aujourd'hui le fournisseur officiel de l'heure au Royaume-Uni. Ce livre n'aurait d'ailleurs pas vu le jour sans Fiona Williams, du NPL, qui en a perçu l'opportunité et la nécessité, et qui a généreusement soutenu ce projet. Je suis également reconnaissant aux scientifiques du NPL, qui n'ont pas compté leur temps pour me transmettre leur savoir et leur expérience, en particulier John Lavery, James « Mac » Steele, Peter Whibberley et Paul Taylor. Je n'oublie pas non plus les nombreuses personnes de divers autres instituts qui m'ont fourni des documents et des illustrations, et ont répondu à mes nombreuses requêtes. Enfin, je remercie le personnel de la bibliothèque du NPL pour son hospitalité, Terry Christien pour ses illustrations, ainsi que Margaret O'Gorman, Robin Rees et Nicki Dennis de l'*Institute of Physics*, qui ont permis à ce livre de voir le jour.

# 1

## Le temps des astronomes

Je suppose que, si vous êtes en train d'entamer cette lecture, c'est que vous vous intéressez à la mesure du temps. C'est bien le sujet de ce livre, même si on l'aborde sous un angle inhabituel. Il est inutile d'y chercher des balanciers ou des échappements, ni même l'histoire de la clepsydre ou de l'hémicyclium, et il vous faudra trouver une autre source si vous souhaitez connaître la différence entre un foliot et une fusée.

En effet, ce livre traite de moyens plus modernes qui, nous le verrons, trouvent leur origine en juin 1955, date du fonctionnement de la première horloge atomique. Les lois physiques qui ont rendu cette horloge possible ont mobilisé l'esprit de nombreux scientifiques de premier ordre. Pour s'en convaincre, reportons-nous à la figure 1, qui donne une liste de 13 lauréats du prix Nobel depuis 1940. Ces prix Nobel de physique n'ont pas été attribués à la légère. Chacun de ces physiciens a été récompensé pour une avancée majeure, qui a fait progresser notre compréhension de la physique. Leur point commun est qu'ils ont tous contribué à la science de la mesure atomique du temps.

### **Des ambitions dignes du prix Nobel**

Parmi eux, seul Otto Stern ne s'est pas directement occupé des horloges atomiques proprement dites. Tous les autres, depuis Isidor

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

Année	Nom des lauréats	Contribution aux horloges atomiques
1943	Otto Stern	Stern a montré comment utiliser des faisceaux d'atomes pour étudier les propriétés magnétiques des atomes et des noyaux.
1944	Isidor Rabi	Rabi, qui collabora pendant deux ans avec Stern, a développé une méthode d'étude des propriétés magnétiques des noyaux par résonance en utilisant des jets atomiques. Il fut le premier à proposer de construire une horloge atomique à jet de césium.
1955	Polykarp Kusch	Kusch, collègue de Rabi, est un pionnier des horloges atomiques. Ses conceptions sont à la base de la première horloge opérationnelle, au NPL.
1964	Nicolai Basov, Aleksander Prochorov, Charles Townes	Ces trois physiciens ont inventé indépendamment un amplificateur de rayonnement, le maser et le laser ; le maser est à la base d'un type d'horloge atomique. Townes a aussi travaillé avec Rabi.
1966	Alfred Kastler	Kastler a inventé la technique de « pompage optique » utilisée dans les horloges atomiques les plus précises.
1989	Norman Ramsey	Ramsey, également un ancien collègue de Rabi, est le père de deux contributions. Il a inventé la « cavité de Ramsey », composant essentiel de toute horloge au césium ; il a aussi construit le premier maser à hydrogène.
1989	Hans Dehmelt, Wolfgang Paul	Dehmelt et Paul ont conçu des méthodes de piégeage d'atomes isolés qu'on utilise aujourd'hui pour la recherche fondamentale sur les horloges du futur.
1997	Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William Phillips	Ces trois physiciens ont développé des méthodes de refroidissement extrême d'atomes, méthodes indispensables aux nouvelles horloges à fontaine de césium.

1. Quelques lauréats du prix Nobel de physique.

Rabi, ont soit construit ou amélioré des horloges atomiques, soit réalisé des travaux dont ils savaient qu'ils permettraient un progrès dans la mesure du temps ou des fréquences.

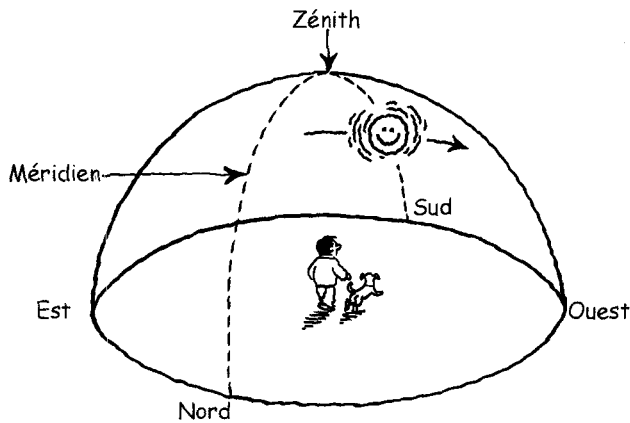
Nous reparlerons de certains d'entre eux plus loin dans ce livre, encore que brièvement, car mon but est davantage de décrire la façon dont le temps est gardé et mesuré aujourd'hui que de raconter l'histoire des horloges atomiques. Pour bien réaliser l'ampleur de la révolution engendrée par l'usage de ces horloges atomiques, il est néanmoins indispensable de les replacer dans le contexte historique et, pour cela, il nous faut remonter à la première méthode de mesure du temps : le Soleil.

### **Le temps solaire**

Durant presque toute la période historique, et jusqu'aux dernières décennies du XX<sup>e</sup> siècle, la mesure du temps s'est fondée sur le mouvement apparent du Soleil dans le ciel. Apparent seulement, car c'est bien la rotation de la Terre autour de son axe qui fait que le Soleil balaie le ciel en 24 heures, et non le mouvement du Soleil lui-même. Quand on emploie le Soleil pour définir les échelles de temps, on s'appuie en fait sur la rotation (supposée) perpétuelle de la Terre pour compter les jours.

Imaginons un grand demi-cercle dans le ciel qui parte du point de l'horizon le plus au nord pour rejoindre le point le plus au sud, en passant par le zénith, la direction à la verticale de votre tête (*voir la figure 2*). Cette ligne, c'est le méridien, qui divise la voûte céleste en deux moitiés, est et ouest. Nous sommes maintenant armés pour définir plus précisément la durée du jour. C'est à midi que le Soleil croise le méridien. Définissons aussi le « jour » comme l'intervalle de temps qui sépare deux traversées consécutives du méridien (on dit aussi des « culminations »). Cette définition a l'avantage de ne pas reposer sur la notion d'horizon – peu importe quand le Soleil se lève ou se couche. Autre mérite, elle ne dépend pas non plus de la durée de la journée, qui varie au long de l'année. La

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?



2. « Midi » est défini comme l'instant où le Soleil coupe le méridien, un demi-cercle imaginaire joignant les horizons nord et sud en passant par le zénith. Le jour solaire est l'intervalle entre deux midis consécutifs.

traversée du méridien par le Soleil nous fournit à la fois le midi et la durée du jour – une échelle de temps et une unité de temps.

La plupart des gens sont surpris d'apprendre que la durée du jour ainsi définie... varie au long de l'année. Si vous vous équipez d'une horloge suffisamment précise et que vous mesurez l'instant de ces culminations solaires, vous trouverez que la longueur de ce jour « solaire » peut varier de 24 heures moins 22 secondes (en septembre) à 24 heures plus 30 secondes (en décembre). De plus, il est fort rare que le Soleil traverse le méridien à midi précise. Qu'est-ce qui peut bien clocher ?

Pour le savoir, nous devons nous pencher plus en détail sur le mouvement apparent du Soleil. La Terre décrit une orbite autour du Soleil, en une année ; de notre point de vue, sur la Terre supposée fixe, le Soleil semble parcourir une orbite autour de la Terre. La trajectoire apparente du Soleil sur le fond de ciel s'appelle l'écliptique. S'il était possible de voir les étoiles et le Soleil en même temps, nous nous rendrions compte que le Soleil se déplace lentement vers l'est le long de l'écliptique, à raison d'environ un degré par jour (en

effet, il y a 360 degrés dans un cercle, et 365 jours dans une année). Pour être plus précis, si l'orbite de la Terre était parfaitement circulaire, le Soleil se déplacerait dans le ciel chaque jour de 0,986 degré.

En fait, à l'instar de la plupart des trajectoires astronomiques dans le Système solaire, la trajectoire de la Terre est une ellipse. Voilà une première raison de la durée variable du jour. Le 3 janvier, la Terre se trouve 5 millions de kilomètres plus près du Soleil qu'elle ne l'est le 4 juillet (à un jour près pour ces deux dates). Quand elle est au plus près du Soleil, la Terre se déplace plus vite sur son orbite. Vu de la Terre, le Soleil semble trotter à 1,019 degré par jour en janvier, alors qu'au début de l'été il se traîne à 0,953 degré par jour. Cette variation de vitesse, si elle était seule en jeu, fournirait des jours plus courts en été qu'en hiver (n'oubliez pas que le Soleil se déplace dans le ciel d'ouest en est !).

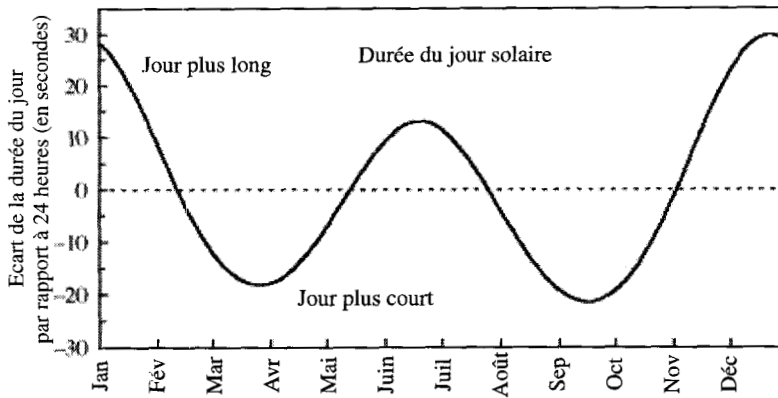
La deuxième cause de la variation de la durée du jour est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite, soit, de façon équivalente, l'angle entre le plan de l'équateur et celui de l'écliptique. La conséquence en est que, outre son mouvement général d'ouest en est, le Soleil se déplace aussi vers le nord au printemps, et vers le sud en automne. Ce n'est qu'aux solstices, aux alentours du 21 juin et du 21 décembre, que le mouvement du Soleil est exactement orienté de l'ouest vers l'est. À tout autre moment de l'année, le mouvement du Soleil a une composante vers le nord ou le sud, et il se déplace donc légèrement moins vite par rapport au méridien. Par conséquent, l'inclinaison, si elle était le seul effet responsable de la variation de la durée du jour, nous fournirait des jours plus longs près des solstices d'été et d'hiver, et plus courts près des équinoxes de printemps et d'automne.

Si l'on combine ces deux effets, on obtient la variation annuelle représentée sur la figure 3. Les fabricants de cadrans solaires la connaissent depuis longtemps, eux qui ont conçu de nombreuses méthodes astucieuses pour en tenir compte dans la conception des cadrans afin que ceux-ci donnent l'heure exacte. Comme



## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

un jour de durée variable dans l'année n'est pas bien utile à qui veut conserver une heure précise, les astronomes ont fini par inventer la notion d'un « soleil moyen », un corps imaginaire qui se déplacerait de façon régulière le long de l'équateur – par opposition à l'écliptique – et à vitesse constante. Ce concept de soleil moyen n'est rien d'autre qu'un artifice mathématique pour éliminer les effets gênants de l'orbite elliptique et de l'inclinaison de l'axe terrestre, dans le but de créer un « jour solaire moyen » de durée constante. Le temps associé au soleil moyen s'appelle (logiquement) le temps solaire moyen, par opposition au temps indiqué par le vrai Soleil (par exemple sur un cadran solaire), qu'on appelle le temps solaire apparent. Ces deux temps peuvent différer de plus de 16 minutes, et la différence est dénommée « équation du temps » (voir la figure 4). Naturellement, le vrai Soleil et le soleil moyen finissent par se retrouver au bout d'un an à la même position, ce qui fait qu'ils restent synchronisés à long terme.

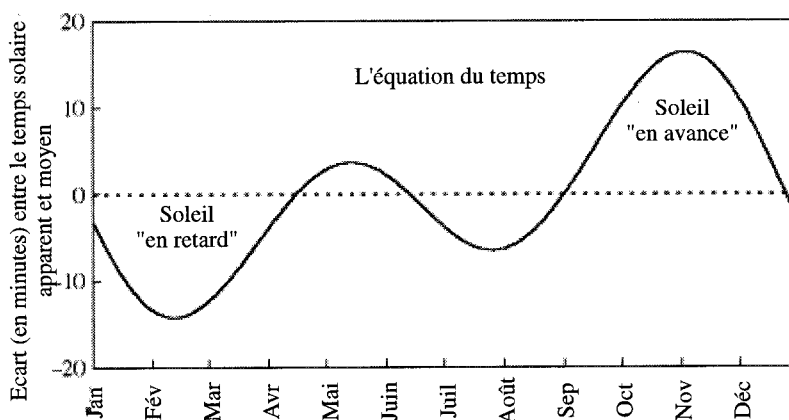


3. Comme l'orbite terrestre n'est pas circulaire, et comme l'axe de rotation terrestre est penché, la durée du jour solaire varie au long de l'année. Elle est plus longue d'une minute environ à la fin décembre qu'à la mi-septembre.

Le temps solaire moyen est resté la base de toute mesure ou référence de temps jusqu'aux dernières décennies. Toutefois, le temps solaire apparent est encore utilisé, en particulier pour la méthode traditionnelle de navigation maritime. Par exemple, l'Almanach Nautique américain donnait encore jusqu'en 1833 le temps solaire apparent.

### Le temps standardisé

Il existe un inconvénient évident à utiliser une heure basée sur le Soleil – même le soleil moyen – : c'est qu'elle n'est pas la même en tout point du Globe. Dès lors que l'on nomme midi l'instant où le soleil moyen traverse le méridien, l'heure va dépendre de la longitude où l'on se trouve. Il sera « midi » à Londres 10 minutes après Paris, et 54 minutes après Berlin. Sans parler de Dublin (25 minutes plus tard) ni de New York (presque 5 heures après). Le cas extrême-



4. L'équation du temps est la différence entre les temps solaires moyen et apparent, due à la durée variable du jour solaire vrai. Le Soleil retarde de plus de 14 minutes sur le soleil moyen à la mi-février et est en avance de plus de 16 minutes début novembre. Un cadran solaire ne donne l'heure solaire moyenne que quatre jours par an : les 16 avril, 14 juin, 2 septembre et 25 décembre (à un jour près). Quand on souhaite régler un cadran solaire au plus juste, il faut le faire à ces dates.

me est celui des habitants de Taveuni, une île des Fidji dont la longitude diffère de celle de Londres de 180 degrés, pour qui il est « minuit » quand il est « midi » à Londres. Cela leur permet d'ailleurs de bénéficier des nouveaux millénaires 12 heures avant les Londoniens.

Jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, tout le monde vivait heureux avec sa version personnelle du temps solaire moyen. Quand le rythme de vie était plus tranquille, et que personne ne voyageait à grande vitesse, peu importait que l'heure de Manchester diffère de celle de Liverpool de trois minutes, ni même que les horloges de l'Amérique du Nord s'en écartent de plusieurs heures. Mais sont arrivés le télégraphe et les chemins de fer, qui ont imposé de s'entendre sur l'heure qu'il est à des distances de centaines ou de milliers de kilomètres. Sinon, comment les trains auraient-ils pu arriver à l'heure ?

La solution – elle vint des États-Unis et du Canada en 1883 – fut l'invention des « fuseaux horaires ». Dans chaque fuseau, on convenait que toutes les pendules donneraient la même heure, différant de l'heure des pendules du fuseau voisin d'exactly une heure. L'idée s'est vite propagée et, en 1884, la conférence internationale de Washington établit un système mondial de fuseaux horaires pour l'ensemble de la planète. Le temps de référence serait à l'avenir le temps solaire moyen de l'Observatoire Royal de Greenwich, à l'est de Londres, un temps désigné depuis 1880 comme le *Greenwich Mean Time*, ou GMT (temps moyen de Greenwich). À ce jour, l'heure GMT n'a plus d'existence légale, mais nous l'utiliserons par commodité dans la suite de ce chapitre, avant de révéler son triste destin.

En principe, les fuseaux horaires divisent la planète en 24 zones égales, de 15 degrés de longitude chacune – un peu comme les quartiers d'une orange. Chaque zone a son temps standard, basé sur le temps solaire moyen de la longitude centrale de la zone, et qui diffère du GMT d'un nombre d'heures entier. Par exemple, tout lieu de longitude comprise entre 7,5 degrés est et 7,5 degrés ouest appartient

au fuseau horaire de Greenwich, et les horloges y donnent l'heure GMT. Entre 7,5 et 22,5 degrés ouest, les horloges indiquent GMT - 1 heure ; de 7,5 à 22,5 degrés est, elles marquent GMT + 1 heure. On définit ainsi de proche en proche chaque fuseau à l'est ou à l'ouest de Greenwich, jusqu'à ce qu'on arrive à l'autre bout du monde. Ce fuseau horaire opposé à celui de Greenwich est centré sur une longitude de 180 degrés et l'heure y diffère de l'heure GMT de 12 heures. Mais s'agit-il de 12 heures *avant* ou 12 heures *après* ? La réponse est : les deux ; cette zone est en effet divisée en son milieu par la Ligne Internationale de Changement de Date. L'heure est la même de part et d'autre de la Ligne, mais les dates y diffèrent d'un jour.

Dans la pratique, tous ces fuseaux horaires ont été largement influencés par la géographie et la politique, et ils ne ressemblent que de loin à leur forme théorique. Même la Ligne de Changement de Date présente quelques bosses nécessaires pour éviter de traverser des régions trop peuplées. Chaque pays décide souverainement de la zone à laquelle il appartient. La plupart des pays d'Europe occidentale ont adopté l'heure de l'Europe centrale (GMT + 1), y compris des pays comme la France ou l'Espagne qui sont situés dans le fuseau de Greenwich. Dans ces deux pays, le midi légal est plus proche de 13 heures au temps solaire moyen que de 12 heures. La Chine s'étend sur trois fuseaux horaires, mais toutes les pendules y indiquent GMT + 8. Il existe même quelques pays où l'heure légale s'écarte de celle de Greenwich d'un nombre d'heures non entier ; l'île de Terre-Neuve est 3 heures 30 avant GMT, alors que le Népal est 5 heures 45 après. Les zones polaires, comme l'Antarctique, n'ont même pas d'heure standard et on y utilise souvent l'heure GMT. Tout cela semble manquer de cohérence, mais ce qui compte finalement, c'est que chaque endroit sur la planète ait son heure légale, reliée à celle de Greenwich.

### **Le temps universel**

En 1912, le Bureau des Longitudes français accueillit une conférence scientifique pour étudier la coordination internationale

de la mesure du temps. Cette conférence conclut à la nécessité de la création d'un organisme international chargé de superviser une telle coordination. L'année suivante, un accord diplomatique signé par 32 pays mettait en place l'Association Internationale de l'Heure, chargée de contrôler le Bureau International de l'Heure (BIH) qui gérerait tous les aspects pratiques de la coordination. Un bureau provisoire fut immédiatement installé, mais le début de la Première Guerre Mondiale empêcha la ratification de l'accord ; le BIH nouvellement créé, installé à l'Observatoire de Paris, demeura orphelin jusqu'à son « adoption » ultérieure par l'Union Astronomique Internationale (UAI) en 1920. L'une des activités principales du BIH était de collecter et corrélérer les observations astronomiques afin de créer un système horaire mondial.

Le premier problème qui se posa concernait la définition de l'heure GMT elle-même. Les astronomes ont tendance à travailler de nuit, et il était particulièrement malcommode pour eux que la date change en plein milieu de leur « journée de travail », en tout cas pour ceux qui se trouvent dans le fuseau de Greenwich (les astronomes fidjiens, au contraire, n'y auraient trouvé que des avantages). Ainsi, les astronomes comptaient toujours l'heure GMT de midi au midi suivant plutôt que de minuit à minuit. Il ne s'agit pas là d'une perversion propre aux astronomes : jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, le jour nautique était également compté de midi à midi ; malheureusement, le jour que les astronomes appelaient lundi était le mardi des marins...

Cette situation confuse, où les astronomes étaient décalés de 12 heures par rapport au reste de l'humanité, persista jusqu'en 1925. L'UAI redéfini alors son heure GMT pour qu'elle commence à minuit, comme pour tout le monde. C'est ainsi que le 31 décembre 1924 des astronomes ne dura que 12 heures au lieu de 24. L'heure GMT des astronomes ne disparut pas complètement : elle demeura sous le nom de GMAT (GMT astronomique). Cela provoqua des confusions persistantes, c'est pourquoi, en 1928, l'UAI prit une décision radicale en rebaptisant le GMT du nom de Temps

Universel (UT, pour *Universal Time*). Le temps UT est simplement le temps solaire moyen du méridien de Greenwich, avec une origine fixée à minuit.

Ainsi, pour la première fois de son histoire, l'humanité était dotée d'un système horaire clair et non ambigu, sur lequel tout le monde était d'accord. Le Temps Universel reposait alors sur le jour solaire moyen, déterminé à partir d'observations astronomiques. Ce jour était divisé en 86 400 secondes, et l'unité de temps, la seconde, était reliée à la rotation terrestre.

### **L'heure d'été**

Vous n'ignorez pas qu'il existe une variante locale du temps solaire moyen. De nombreux pays se plaisent à avancer les pendules d'une heure au printemps, afin de prolonger d'autant les soirées d'été. Les 15 pays de l'Union Européenne, par exemple, avancent tous leurs pendules d'une heure le dernier dimanche de mars à 1 heure GMT, avant de les retarder d'une heure le dernier dimanche d'octobre.

Pendant cette période d'heure d'été, le Soleil se lève une heure plus tard, d'après les horloges, et il traverse de même le méridien une heure plus tard pour se coucher une heure après. Cela implique, pour des pays comme l'Espagne qui sont déjà en avance d'une heure sur le temps solaire de leur fuseau géographique, que le midi vrai correspond à 14 heures sur les horloges. Cela ne change évidemment pas la durée de la journée, mais ne fait que donner l'illusion de soirées plus longues. Ce qui se passe en fait, c'est que chacun se lève une heure plus tôt qu'il ne le ferait autrement. Si les gouvernements demandaient à tous les citoyens de se lever une heure plus tôt en été, les protestations seraient immédiates ; c'est pourtant bien ce qui se passe avec l'heure d'été.

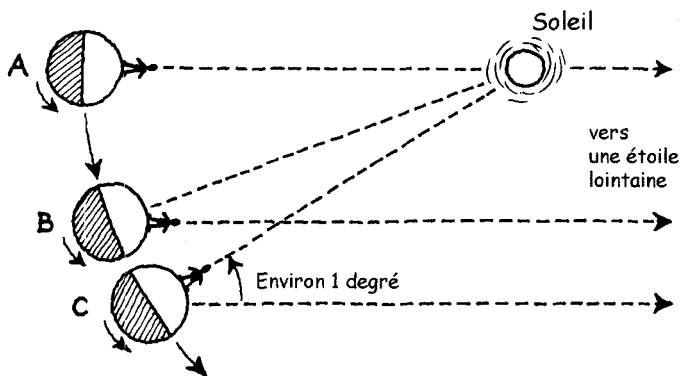
### **Le temps sidéral**

Nous avons dit que le Temps Universel (UT) est déterminé à partir d'observations astronomiques. En fait, bien qu'il repose sur le

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

jour solaire moyen, personne n'a jamais évalué le temps UT à partir des mesures du Soleil, à l'exception des navigateurs en haute mer. Le Soleil couvre un demi-degré dans le ciel. Il lui faut deux minutes pour se déplacer de son propre diamètre, et il est donc très difficile de mesurer la position de ce disque aveuglant avec quelque précision. Quant au soleil moyen, un objet imaginaire, inutile de dire qu'il n'est pas observable.

En pratique, les astronomes mesurent donc le temps en observant les étoiles. Comme le Soleil, les étoiles se lèvent puis se couchent après avoir traversé le ciel. En observant la traversée du méridien par les étoiles, les astronomes définissent le « jour sidéral ». D'où une petite subtilité : l'intervalle de temps entre deux traversées successives du méridien par une étoile, ce fameux jour sidéral, est légèrement plus court que le jour solaire moyen. Pour être précis, il dure 23 heures 56 minutes et 4 secondes.



5. Le jour sidéral est légèrement plus court que le jour solaire. Quand la Terre est en A, l'étoile lointaine traverse le méridien en même temps que le Soleil. Quand la Terre arrive en B, la même étoile est de nouveau au méridien – un jour sidéral s'est écoulé – mais il faut que la Terre tourne encore un peu pour que le Soleil se retrouve à son tour au méridien – un jour solaire s'est écoulé. La différence est d'environ 4 minutes de temps, ou 1 degré d'angle.

Pour en comprendre la raison, regardons la figure 5. Quand la Terre est en A, le Soleil et une certaine étoile traversent ensemble le méridien (bien évidemment, l'étoile n'est pas observable car on est en plein jour). Le lendemain, la Terre arrive en B : elle a effectué une rotation complète sur elle-même, ce qui fait que la même étoile traverse à nouveau le méridien. Dans le même temps, la Terre a aussi tourné autour du Soleil et ce dernier n'est donc pas encore au méridien. Il faut attendre que la Terre tourne un peu plus – 0,986 degré – pour que le Soleil « rattrape » le méridien, en C : un jour solaire s'est alors écoulé. Cette fraction de rotation supplémentaire prend 3 minutes et 56 secondes (une fraction  $1/365$  de 24 heures). Quand on cumule toutes ces fractions de rotation sur une année, cela fait une rotation complète de la Terre. Ainsi, si une année comporte 365 jours solaires, elle a 366 jours sidéraux.

Comme le soleil moyen se déplace à vitesse constante par rapport aux étoiles – c'est là son intérêt – les durées du jour solaire moyen et du jour sidéral sont dans un rapport fixe. Cela permet, en pratique, de déterminer d'abord le temps sidéral en chronométrant les culminations des étoiles, puis d'en déduire le Temps Universel par une simple correction arithmétique.

De la même façon que le temps solaire nous indique l'orientation de la Terre par rapport au Soleil, le temps sidéral est, lui, une mesure de notre orientation par rapport aux étoiles. Chaque observatoire astronomique est équipé d'une horloge donnant le temps sidéral local (LST, pour *Local Sidereal Time*). Quand cette horloge indique 17 heures 46 LST par exemple, tous les astronomes savent bien que le centre de notre Galaxie traverse le méridien, et que c'est le moment idéal pour l'observer. S'ils s'intéressent à la Nébuleuse d'Orion, la bonne heure est 5 heures 35 LST ; pour la Galaxie d'Andromède, c'est 0 heure 43. Le temps sidéral coïncide exactement avec le temps solaire moyen à l'équinoxe d'automne, puis il gagne environ 4 minutes par jour, pour rattraper un jour sidéral entier une année plus tard.



Le temps sidéral se mesure en heures, minutes et secondes, comme le temps solaire, mis à part le fait que celles-ci sont légèrement plus courtes que les heures, minutes et secondes solaires. De plus, comme le temps solaire, le temps sidéral est différent pour chaque longitude<sup>1</sup> ; c'est pourquoi les astronomes utilisent également le Temps Sidéral de Greenwich, analogue sidéral du GMT.

### **La Terre complique tout**

Dans les années 1920, les astronomes ont donc établi une échelle de temps prétendument uniforme, le Temps Universel, basée sur le mouvement moyen du Soleil (en fait sur la rotation de la Terre) et que l'on évalue en chronométrant le mouvement apparent des étoiles. C'est alors qu'on se rend compte que la Terre ne tourne pas si rond que cela.

Déjà, au II<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ, l'astronome grec Hipparque avait découvert que l'axe de rotation terrestre ne pointe pas dans une direction immuable. Tout comme une toupie en rotation, il dessine lentement un cercle dans le ciel, en 25 800 ans. De nos jours, le Pôle Nord céleste pointe en direction de l'étoile polaire (c'est de là qu'elle tire son nom). Cependant, il y a 4 500 ans, il indiquait l'étoile Thuban de la constellation du Dragon, et dans 14 000 ans ce sera le tour de Véga, une étoile brillante de la Lyre. Comme si cela ne suffisait pas, une légère oscillation se superpose à cette rotation : on l'appelle la nutation. Ces deux phénomènes – la précession et la nutation – sont dus à l'influence conjuguée de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial terrestre<sup>2</sup> ; les effets en sont calculables et donc prévisibles.

---

1. À l'équateur terrestre, le temps sidéral varie d'une seconde tous les 465 mètres. En conséquence, dans les grands observatoires astronomiques comportant de nombreux télescopes éloignés, chacun devrait disposer d'une horloge donnant son temps sidéral propre (N.d.T.).

2. Du fait de sa rotation, la Terre n'est pas exactement sphérique. Son diamètre à l'équateur est plus grand que son diamètre polaire, d'environ 0,33 pour cent, d'où la dénomination de « bourrelet équatorial » (N.d.T.).

Ce sont les observations de la Lune qui ont fourni les premières indications que la rotation de la Terre posait un problème. Aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, de nombreux astronomes se penchaient sur le problème de la détermination de la longitude par des marins en haute mer, un problème équivalent à celui de disposer d'une échelle de temps fiable. Au bout du compte, la réponse allait venir du développement des montres et chronomètres, mais à l'époque les astronomes pensaient plutôt utiliser la Lune à la façon d'une horloge céleste. De même que les aiguilles d'une montre tournent sur le cadran, la Lune balaie le ciel une fois par mois environ. Imaginons que nous soyons capable de calculer précisément le mouvement de la Lune : un navigateur pourrait alors déduire l'heure qu'il est à partir de la position de la Lune par rapport aux étoiles, simplement en consultant un almanach.

En 1695, Edmond Halley, l'un des scientifiques les plus brillants de son temps, publia une étude des anciennes éclipses. Il avait analysé des relations historiques de ces éclipses dans le but de connaître la position de la Lune dans le passé ; le seul problème était qu'il n'arrivait pas à réconcilier simplement les observations anciennes et modernes. Pour y arriver, il semblait nécessaire que la Lune tournât aujourd'hui plus vite sur son orbite que par le passé.

En 1749, Richard Dunthorne confirma ce résultat, et déduisit en outre de ces anciennes observations que la Lune présentait une « avance » inexplicable de presque deux degrés en plus de 2 400 ans. Les meilleurs mathématiciens de l'époque se penchèrent sur le problème, mais aucun n'arriva à « accélérer » le mouvement de la Lune.

Une solution fut proposée en 1787 par Pierre-Simon de Laplace, un mathématicien français qui avait étudié les déformations de l'orbite terrestre sous l'influence perturbatrice des autres planètes. Il en résultait une variation de l'attraction solaire sur la Lune qui expliquait l'accélération de cette dernière. Les calculs de Laplace étaient en bon accord avec les résultats de Dunthorne et

d'autres : cette découverte fut considérée comme un triomphe de la mécanique céleste. En 1853 néanmoins, l'astronome John Couch Adams, celui-là même qui avait prédit l'existence de Neptune quelques années plus tôt, refit le calcul avec plus de précision et montra que la théorie de Laplace n'expliquait que la moitié de l'accélération lunaire observée ; mais ses calculs ne furent pas acceptés par l'ensemble des astronomes.

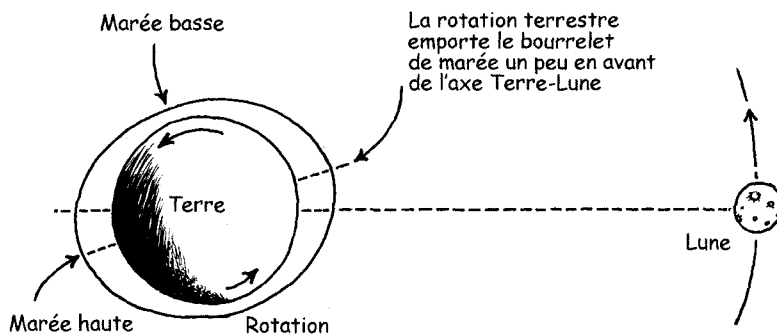
Il fallut attendre 1860 pour que les astronomes commencent à réaliser qu'une partie au moins de cette accélération apparente de la Lune pouvait être due à un *ralentissement* de la rotation terrestre. Dans ce cas, le jour solaire moyen ne peut plus être de durée constante : il s'allonge, et les heures, les minutes et les secondes l'accompagnent dans cet allongement. D'où la question suivante : si les unités de temps elles-mêmes varient, quel en est l'effet sur la Lune ?

Imaginons pour simplifier que le mouvement de la Lune autour de la Terre soit une rotation uniforme. Autrement dit, dans un intervalle de temps physique constant, la Lune parcourt toujours le même arc d'orbite autour de la Terre. Si la rotation terrestre se ralentit, le jour s'allonge et, chaque jour, la Lune semble faire un parcours imperceptiblement plus grand que la veille. Si nous ignorons que c'est en fait la Terre qui ralentit, nous en concluons naturellement que c'est le mouvement de la Lune qui accélère. En cumulant sur plusieurs siècles ces écarts imperceptibles entre le lieu où la Lune devrait être et celui où elle est réellement, on arrive à des effets observables. Et c'est bien ce sur quoi Halley et ses émules avaient mis le doigt quand ils tentaient de concilier observations anciennes et modernes.

Mais quelle pouvait bien être la cause de ce ralentissement ? La réponse vint indépendamment du météorologue américain William Ferrel et de l'astronome français Charles-Eugène Delaunay : les marées. Cette variation biquotidienne du niveau des océans nous est familière. Nous savons aujourd'hui que ces marées

sont dues à l'attraction gravitationnelle de la Lune et, dans une moindre mesure, du Soleil. L'attraction gravitationnelle de la Lune décroît avec la distance. Il s'ensuit que l'attraction lunaire est un peu plus grande sur la Terre du côté tourné vers la Lune, et un peu plus faible du côté opposé. Il résulte de cette différence une force d'étirement qui tend à déformer la Terre en « ballon de rugby » avec l'axe de la balle dirigé vers la Lune. L'eau des océans a évidemment plus de facilité à s'écouler que la croûte terrestre, et elle forme deux « bourrelets », d'une hauteur moyenne d'environ 50 centimètres, l'un face à la Lune et l'autre à l'opposé. Pendant ce temps, la Terre solide tourne « sous » ces bourrelets, ce qui fait que nous voyons les eaux monter puis descendre (*voir la figure 6*).

La Terre tourne sur elle-même plus vite que la Lune ne tourne autour d'elle ; à cause de cela, les bourrelets de marées sont emportés par la rotation terrestre un peu en avant de là où ils se trouveraient en l'absence de rotation (exactement dans l'alignement Terre-Lune). C'est pourquoi, en moyenne, les marées hautes se produisent un peu



6. La Lune soulève deux bourrelets de marée dans les océans terrestres, et ceux-ci sont entraînés par la rotation terrestre. La friction entre ces eaux « sur-élevées » et le lit des océans dissipe l'énergie de rotation terrestre au taux de 4 millions de mégawatts, d'où un ralentissement de cette rotation. Simultanément, la Lune s'éloigne graduellement de la Terre.

après que la Lune ait franchi le méridien. Cet entraînement provoque une friction entre l'eau des océans et les fonds marins, particulièrement en eau peu profonde, près des plateaux continentaux.

Ferrel et Delaunay ont montré que la chaleur dissipée par cette friction, environ 4 000 milliards de watts, correspond à un ralentissement faible mais mesurable de la rotation terrestre. Les bourrelets agissent en quelque sorte comme les patins de frein sur les roues d'une voiture, ralentissant progressivement la Terre et transformant son énergie de rotation en chaleur. Autrement dit, le jour s'allonge à cause du frottement des marées.

Ce même frottement a une autre conséquence : la diminution du moment cinétique de la Terre<sup>3</sup>. L'un des principes de la physique veut que le moment cinétique total soit conservé : il ne peut être créé ni détruit. Si la Terre en perd, il doit s'en retrouver ailleurs. Ferrel et Delaunay, toujours eux, ont montré qu'il est transféré à la Lune, dont le moment cinétique augmente donc. On pourrait en conclure, un peu vite, que la Lune accélère quand la Terre ralentit, et que c'est de là que vient l'« accélération » du mouvement lunaire. Ce n'est pas si simple ! Un calcul montre que le ralentissement de la rotation terrestre s'accompagne en fait d'un éloignement progressif de la Lune – environ 4 centimètres par an<sup>4</sup>. L'orbite de la Lune s'agrandit, et notre satellite s'y déplace plus lentement. En conclusion, le ralentissement de la rotation terrestre s'accompagne en fait d'une *décélération* du mouvement orbital de la Lune ; ce n'est que lorsque notre système de mesure du temps est calé sur le jour

---

3. Le moment cinétique mesure la « quantité de rotation » d'un corps ; il est pour la rotation l'analogue de la quantité de mouvement pour une translation. Pour une petite masse  $m$ , de vitesse  $v$  et à distance  $r$  de l'axe de rotation, il vaut  $mvr$ . Pour un corps étendu, on le découpe par la pensée en petites sous-masses, dont on additionne les moments cinétiques individuels (N.d.T.).

4. Cet éloignement a été mesuré depuis 1969 grâce aux réflecteurs laser déposés entre autres lors des missions Apollo. Ces mesures, qui servent aussi à déterminer le Temps Universel, sont détaillées au chapitre 5 (N.d.T.).

solaire moyen, qui s'allonge, que cette décélération réelle se transforme en accélération apparente. Pas étonnant que les astronomes aient un peu tâtonné !

Les effets de marée ne sont pas à sens unique. La Lune n'a pas d'océan, mais la gravité terrestre est bien plus forte que celle de la Lune et elle soulève donc des marées dans la croûte solide de la Lune, d'une hauteur d'environ 10 mètres. Cela provoque des « tremblements de Lune » que détectent les sismographes laissés sur la Lune par les astronautes d'Apollo. On pense que ce sont ces forces de marée dues à la Terre qui ont freiné la rotation de la Lune sur elle-même jusqu'à l'arrêter, du point de vue de la Terre, de sorte que la Lune nous présente toujours la même face. Un jour, les effets de marée auront tellement freiné la rotation terrestre que la Terre, elle aussi, tournera toujours la même face vers la Lune ; il y aura un hémisphère terrestre où la Lune flottera, immobile, dans le ciel, et l'autre hémisphère d'où elle sera à jamais absente. Un conseil aux agences de voyages : préparez-vous à un marché en expansion, celui des voyages de l'hémisphère sans Lune vers l'hémisphère avec<sup>5</sup>.

Le ralentissement régulier de la rotation terrestre sous l'effet des marées ne constitue pas le fin mot de l'histoire. Depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les observations de la Lune ont montré que son « accélération » ne correspondait pas à la variation régulière provoquée par les marées. Même en tenant compte de leur effet, la Lune est tantôt en avance et tantôt en retard sur sa position prévue, et ce à l'échelle de plusieurs décennies. Malgré cela, et en dépit de la preuve que la rotation terrestre ralentit, les astronomes se refusaient à admettre que ses irrégularités étaient dues à des fluctuations de la rotation terrestre elle-même plutôt qu'à la dynamique de la Lune. En 1915, on semblait avoir épuisé toute explication alternative

---

5. *Humour tout britannique ! Au rythme actuel, cela ne se produira pas avant 5 milliards d'années. (N.d.T.)*

du phénomène – de la matière invisible dans le Système solaire, des effets magnétiques, voire des essaims de météorites.

Naturellement, si la rotation terrestre était vraiment variable, alors non seulement la Lune, mais également le Soleil et toutes les autres planètes présenteraient des fluctuations semblables. Toutefois, comme le déplacement de ces autres corps célestes dans le ciel est plus lent que celui de la Lune, les irrégularités n'en sont que plus difficiles à mettre en évidence. Il fallut attendre 1939 pour que Sir Harold Spencer Jones, alors Astronome Royal d'Angleterre, démontre que la Lune, le Soleil et Mercure présentent des variations similaires, et ce depuis les premières observations télescopiques fiables de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. En fin de compte, ce n'étaient pas les mouvements des corps célestes qui fluctuaient, mais la rotation de la Terre et, avec elle, l'unité de temps.

Dans les années 1880, on fit une autre découverte, pas vraiment inattendue. En mesurant précisément la position des étoiles tout au long de l'année, on se rendit compte que la latitude de tous les observatoires astronomiques variait imperceptiblement, et que cela s'expliquait bien par un mouvement des pôles de la Terre. Seth Chandler, devenu astronome à l'université de Harvard après avoir été actuaire, analysa deux siècles d'observations et mit en évidence deux composantes de ce mouvement polaire : une rotation annuelle, et une autre d'une période de 428 jours. Il ne faut pas confondre cette « oscillation des pôles » avec la précession – il ne s'agit pas ici d'une variation de l'orientation de l'axe des pôles dans l'espace, mais bien d'un déplacement de l'axe par rapport à la surface terrestre. Si nous pouvions repérer la position du pôle Nord avec un piquet, nous pourrions, en nous tenant sur la banquise, le voir dériver et tracer grossièrement un cercle d'une vingtaine de mètres de diamètre en une année.

Dans les années 1930, des scientifiques allemands et français mirent en évidence une autre irrégularité de la rotation terrestre à l'aide des horloges les plus précises de l'époque. La durée du jour variait au cours de l'année, dans une sorte de remake miniature de

l'« équation du temps », avec un retard atteignant 30 millisecondes à la fin du printemps et une avance comparable à l'automne.

Au début des années 1940, on se retrouvait donc avec un jour dont non seulement la durée augmentait – et avec elle celle de l'heure, de la minute et de la seconde – mais dont en plus l'accroissement n'était pas uniforme. Le jour était plus court en été qu'en hiver, d'une petite milliseconde, les pôles gigotaient et, pire encore, des fluctuations apparemment imprévisibles se produisaient. L'origine de ces fluctuations pouvait se trouver dans des processus inconnus, voire « inconnaissables », au cœur même du Globe terrestre. De nombreux astronomes en étaient arrivés à la conclusion douloureuse qu'on ne pouvait plus se fier à la Terre comme base de la mesure du temps.

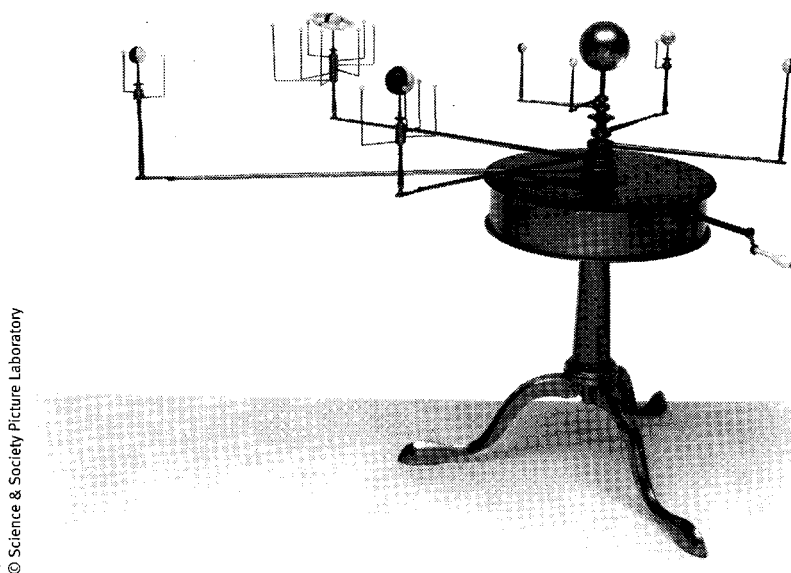
### **Le temps des éphémérides**

Si l'on renonçait à fonder une échelle de temps uniforme sur la rotation terrestre, vers quoi pouvait-on bien se tourner ? L'une des premières propositions fut émise en 1927 par André Danjon, de l'Observatoire de Strasbourg. Il proposait d'abandonner la rotation terrestre au profit de la révolution des planètes autour du Soleil, ce qui revenait à remplacer le jour par l'année comme base de la mesure du temps.

Pourquoi n'y avait-on pas pensé plus tôt ! Cela paraissait évident. Depuis qu'Isaac Newton avait montré que les mouvements des planètes se déduisent d'une loi unique de la gravitation, la vision du Système solaire comme un chef-d'œuvre d'horlogerie était répandue. On peut voir de tels modèles mécaniques du Système solaire dans de nombreux musées des sciences ; on les appelle des planétaires (*voir la figure 7*). Les planètes s'y déplacent sur leurs « orbites » à des vitesses qui, grâce à un système d'engrenages, reproduisent les proportions réelles. Dans la Nature, les planètes se déplacent indépendamment les unes des autres – il n'y a pas d'engrenages – mais la régularité de la loi physique est telle que le Système Solaire se



## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?



© Science & Society Picture Laboratory

7. Ce planétaire date de 1800 environ. La grande boule centrale représente le Soleil, et les autres sont les planètes – de gauche à droite Uranus, Saturne, Jupiter, Vénus, Mercure, la Terre et Mars. Les principaux satellites sont aussi représentés. La manivelle située sur la droite entraîne un système d'engrenages qui donne aux planètes et à leurs satellites des vitesses correctes en valeur relative. La vitesse de rotation de cette manivelle est l'exact analogue du « Temps des Éphémérides ».

comporte comme si ces orbites étaient liées, toutes animées par un moteur caché qui entraîne régulièrement les planètes.

La « pulsation » régulière qui rythme le mouvement des planètes a reçu le nom de temps newtonien. C'est ce temps que les astronomes utilisent pour prédire la position des planètes à n'importe quel instant passé ou à venir. Le temps newtonien s'écoule uniformément, par définition, sans être altéré par les caprices de la rotation terrestre.

La suggestion de Danjon n'eut aucune conséquence concrète avant 1948, année où Gerald Clemence, de l'USNO (Observatoire de la marine américaine), publia une proposition détaillée qui allait exactement dans le même sens. Clemence proposait que le temps

utilisé par les astronomes pour calculer la position du Soleil devienne la nouvelle base de la mesure du temps. Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, cette position était calculée à partir d'une formule élaborée par Simon Newcomb, un astronome du bureau de l'Almanach Nautique américain. La formule donnait la position du Soleil à n'importe quel instant mais, pour des raisons pratiques, ces positions étaient calculées à intervalle régulier. Une telle table est dénommée une éphéméride : on cherche la date et l'heure souhaitée dans la table et on y lit la position du Soleil. Clemence montra aussi comment modifier les éphémérides de la Lune et des planètes afin que toutes utilisent le même temps newtonien que les éphémérides du Soleil.

En principe, il est alors fort simple de connaître l'heure. Il ne faut plus la déterminer en observant le passage des étoiles au méridien, mais mesurer la position de la Lune et des planètes par rapport aux étoiles. Puis, on regarde dans les éphémérides à quel moment les planètes doivent se trouver dans ces positions. (On lit en quelque sorte les éphémérides à l'envers.) Grâce aux « engrenages » imaginaires de la gravitation, le temps déduit doit toujours être le même quel que soit l'astre que l'on observe.

En 1950, Clemence détailla ses idées lors d'une conférence réunie par l'Union Astronomique Internationale (UAI) à Paris, et dont l'organisateur était Danjon, alors directeur de l'Observatoire de Paris. La conférence recommanda un système de mesure du temps fondé sur la formule de Newcomb, qu'on nommerait le Temps des Éphémérides (TE) d'après une suggestion de Dirk Brouwer, un astronome de l'université de Yale (États-Unis). L'unité de base du TE serait la longueur de l'année sidérale en 1900, soit le temps mis par la Terre pour faire exactement un tour du Soleil par rapport aux étoiles. La longueur de l'année varie légèrement, c'est pourquoi il fallait préciser l'année de référence 1900 – mais ces variations sont faibles et bien connues. Cette recommandation fut adoptée par l'Assemblée Générale de l'UAI en 1952.

### « Pour tous, et pour l'éternité »

Oublions un instant les astronomes et tournons-nous vers le reste de l'humanité : comment cette écrasante majorité fait-elle pour mesurer le temps ? Jusque dans les années 1950, peu nombreux étaient ceux qui s'étaient creusé la tête sur cette question, hors de la communauté scientifique. Même l'unité officielle de temps, la seconde, était considérée simplement comme la fraction  $1/86\,400$  du jour, avec l'hypothèse implicite que le jour – le jour solaire moyen – avait une durée constante.

Cette attitude « laxiste » vis-à-vis du temps s'opposait nettement aux définitions strictes des autres grandeurs physiques. La recherche d'une définition d'un système rationnel d'unités trouve son origine en France, lors de la période révolutionnaire des années 1790. L'Académie des Sciences française fut chargée de définir un système cohérent d'unités destiné à se substituer à la multitude de mesures locales alors en usage en France.

Les académiciens partirent du principe, repris par leurs successeurs, que les unités ne pouvaient être arbitraires, comme le volume d'un tonneau ou la longueur d'un avant-bras, fût-il royal, mais qu'elles devaient se fonder sur la Nature. Le mètre, la nouvelle unité de longueur, en fut le premier exemple. Quand il fut conçu, on le définit comme la dix-millionième partie de la distance entre le pôle Nord et l'équateur, mesurée le long du méridien de Paris. Des arpenteurs consacrèrent six années pleines de risques à mesurer ce méridien à travers la France et l'Espagne, à une époque où ces deux pays étaient au bord de la guerre ; le résultat de leurs efforts fut conservé sous la forme d'une barre de platine dont la longueur devint, en 1799, le mètre légal. On se tourna ensuite vers l'unité de masse. Le gramme, à l'origine la masse d'un centimètre cube d'eau à une température de 4 degrés, fut concrétisé sous la forme d'un cylindre de platine de 1 000 grammes, le kilogramme étalon. Les fondateurs de ce « système métrique » formulèrent l'espoir qu'il inaugurerait un système d'unités destiné « à tous et pour l'éternité ».

Les tentatives de rationaliser la mesure du temps rencontrèrent un succès plus mitigé. L'Académie proposa de diviser la journée en 10 nouvelles heures, chacune comprenant 100 nouvelles minutes, elles-mêmes divisées en 100 nouvelles secondes. Il y aurait donc eu 100 000 de ces nouvelles secondes dans une journée, chacune égale à 0,864 seconde de temps solaire moyen. Cela ne remettait pas en cause l'unité de base, le jour solaire moyen. Cette proposition – par trop révolutionnaire – fut abandonnée en 1795, car elle faisait face à une résistance acharnée, ce qui n'empêcha pas la fabrication de quelques montres avec un cadran de 10 heures.

Les grandes manœuvres pour une internationalisation de ce système de mesures débutèrent en 1875, avec la signature de la « Convention du Mètre » par 17 pays. La Convention institua le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), qui avait pour tâche de gérer les nouveaux étalons de mesure (nous y reviendrons plus loin). Le BIPM était, et est encore, supervisé par le Comité International des Poids et Mesures (CIPM), qui doit lui-même rendre compte à la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), constituée de délégués des gouvernements des pays signataires. La CGPM, qui se réunit tous les quatre ans, est l'autorité ultime en matière de définition des unités – quand elle en choisit une, pas question de discuter. En raison du rôle historique de la France dans la promotion de ce nouveau système d'unités, le BIPM fut installé au Pavillon de Breteuil, à Sèvres dans la banlieue parisienne, où il se trouve toujours (*voir la figure 8*).

En 1899, au cours de la première réunion de la CGPM, furent dévoilés les tout nouveaux « mètre international » et « kilogramme international », aussi proches que possible des étalons français originaux de la fin du siècle précédent. Le mètre international était une barre de platine iridié conservée au BIPM. Le mètre était, par définition, la distance entre deux fines encoches dans la barre, mesurée dans des conditions bien spécifiées. Vingt-neuf copies en furent distribuées aux laboratoires des étalons de mesure nationaux ; on les

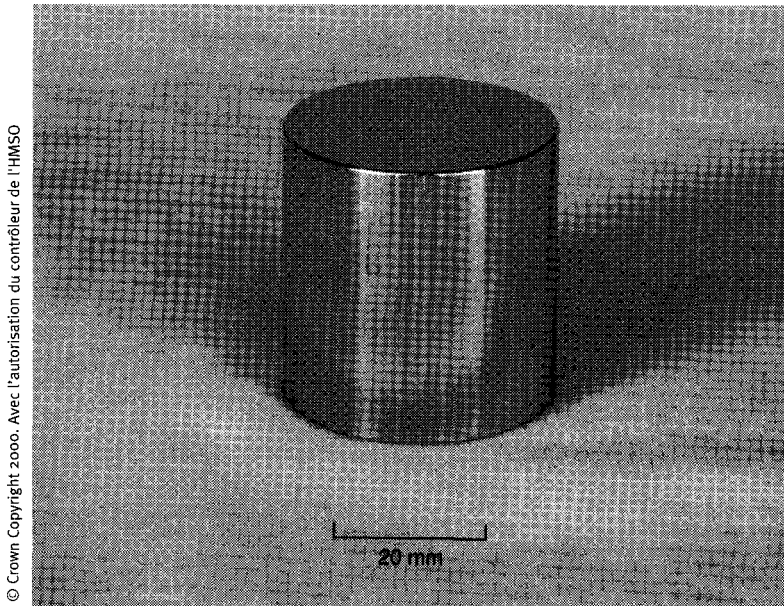
rapportait régulièrement à Sèvres afin de vérifier qu'elles étaient toujours exactes. L'étalon britannique, par exemple, est conservé au NPL (*National Physical Laboratory*) et il a été ré-étalonné à Sèvres à six reprises jusque dans le courant des années 1950. Aujourd'hui caduc, il est exposé au musée du NPL.

Le kilogramme international, qui est encore à ce jour l'étalon international de masse, est un cylindre en alliage de platine iridié (tout comme le mètre international) conservé au BIPM. L'exemplaire britannique a été ré-étalonné quatre fois ; il est identique à l'étalon à mieux qu'une partie pour cent millions (*voir la figure 9*).

Et la « seconde internationale » ? Le temps, bien évidemment, est différent de la longueur et de la masse. Essayez un peu de fabriquer une seconde en platine iridié... Le temps présente une « qualité » différente, d'où la définition de la seconde jusqu'à la fin des années 1950 comme la 86 400<sup>e</sup> partie du jour solaire moyen, sous l'hypothèse que ce jour était aisément accessible à la mesure par l'observation et, de plus, constant. À charge pour les astronomes de fournir cette durée du jour.



8. Le Pavillon de Breteuil, siège du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), à Sèvres près de Paris. Le BIPM est le gardien des étalons de mesures internationaux. Il a statut d'ambassade.



9. La copie britannique du kilogramme international, conservée au National Physical Laboratory. Il n'est pas aussi aisé de définir la seconde !

### **Une nouvelle seconde**

Vers 1950, la CGPM s'engagea dans l'entreprise plus ambitieuse d'une rationalisation de l'ensemble des unités de mesure, commerciales aussi bien que scientifiques, afin de constituer un système cohérent à usage international. Ce nouveau Système International d'unités (ou SI) devait se fonder sur six unités (plus tard sept) desquelles on pouvait déduire toutes les autres unités de mesures. Le CIPM suivait avec intérêt le débat entre astronomes sur le Temps des Éphémérides, et il vit là l'occasion de formuler une définition précise de la seconde. En 1956, il mit sur pied un comité de représentants de l'UAI et des laboratoires nationaux d'étalons de mesure qui avait pour tâche de formuler une recommandation sur la définition de la seconde à intégrer dans le nouveau système SI.

Depuis sa décision d'adopter le temps des éphémérides TE en 1952, l'UAI avait un peu révisé sa définition et elle proposa de fonder le temps des éphémérides non pas sur l'année sidérale, mais sur l'année dite « tropique ». La raison en était simple : bien que les étoiles fournissent un système de référence commode et solide pour mesurer la durée d'une orbite terrestre, cette période n'est pas la plus importante dans la vie de tous les jours, y compris dans celle des scientifiques. L'année la mieux adaptée est celle qui reste ajustée sur les saisons et est mesurée d'un équinoxe de printemps au suivant. À cause de la précession de l'axe de rotation terrestre, cette année tropique est plus courte que l'année sidérale de 20,4 minutes. Si l'on avait choisi l'année sidérale, les saisons auraient commencé à dériver au long de l'année, au rythme d'un jour tous les 70 ans environ. L'on se serait retrouvé en l'an 4000 avec un équinoxe de printemps en février et un solstice d'hiver en novembre !

À l'issue de discussions avec l'UAI, le CIPM décida d'une définition officielle de la seconde qui serait en cohérence avec la nouvelle échelle du temps des éphémérides. Il recommanda donc, en 1956, que la seconde SI soit la fraction  $1/31\,556\,925,9747$  de l'année tropique, le 0 janvier 1900 à 12 heures TE (une façon exotique de désigner le 31 décembre 1899). Après cette première définition précise de la seconde, il ne restait plus qu'à définir le point de départ du temps des éphémérides. Ce fut l'objet de la décision de l'UAI de 1958 selon laquelle « le Temps des Éphémérides TE est repéré à compter du moment, proche du début de l'année calendaire 1900, où la longitude géométrique moyenne du Soleil était de  $279^{\circ} 41' 48,04''$ , ce qui correspond exactement au 0 janvier 1900 à 12 heures pour le TE. » Ces définitions un peu pesantes avaient en fait été choisies avec soin. Ces chiffres découlaient de la formule de Simon Newcomb pour les éphémérides du Soleil, et les définitions elles-mêmes garantissaient que le nouveau TE s'inscrirait dans la continuité des observations plus anciennes du Soleil. Personne ne semblait gêné par le fait que la formule de Newcomb s'appuie, entre

autres, sur des observations datant de 1750, et nous verrons plus loin quelles en furent les conséquences.

À partir de 1960, les tables astronomiques commencèrent à utiliser le temps TE et, la même année, le système SI fut ratifié par la CGPM. Le monde avait enfin un système cohérent d'unités comprenant le trio « de base » masse, longueur, temps. L'unité de masse était maintenant le kilogramme, défini comme la masse du cylindre en platine iridié conservé au Pavillon de Breteuil depuis 1889. Ceux qui le souhaitaient pouvaient se rendre à Paris avec leur étalon national et le comparer au prototype international. L'unité de longueur, le mètre, était maintenant définie à partir de la longueur d'onde d'une certaine lumière émise par une lampe au krypton. N'importe qui pouvait réaliser un mètre dans son laboratoire s'il était convenablement équipé. Quant au temps, l'unité en était la seconde, définie comme la fraction  $1/31\,556\,925,9747$  de l'année tropique au 0 janvier 1900 à 12 heures TE. Oui, mais en pratique, comment « fabriquer » une seconde ?





# 2

## Le temps des physiciens

À ce stade de notre discussion sur la mesure du temps, il est un point que nous avons omis d'aborder. Nous avons vu comment les échelles de temps reposent sur la rotation de la Terre ou bien sur les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes. Dans la pratique, quand nous voulons connaître l'heure, par exemple pour savoir quand déjeuner ou quand aller chercher les enfants à l'école, nous ne regardons pas le ciel. Pour cela, nous disposons d'horloges et de montres. À l'origine, le but d'une horloge était de subdiviser le jour solaire moyen en intervalles de temps plus commodes : les heures, les minutes et les secondes. De temps à autre, il fallait réajuster son horloge par comparaison avec une horloge plus précise, laquelle tenait elle-même son heure des observatoires astronomiques qui la calculaient à partir d'observations des étoiles.

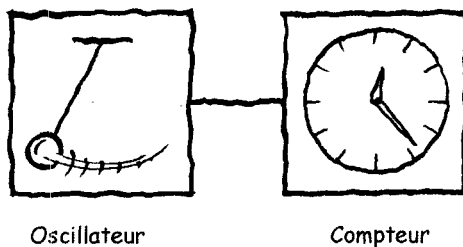
Quand on les utilise de cette façon, les horloges sont des étalons secondaires de temps, qui fournissent une certaine échelle de temps entre deux étalonnages (deux « remises à l'heure »). Alors pourquoi ne pas utiliser ces horloges comme étalons primaires, pourquoi ne pas fonder notre échelle de temps sur elles ? Il n'existe aucune raison pour qu'une horloge suffisamment « bonne » ne fournisse une échelle de temps complètement indépendante de la rotation terrestre, des mouvements des planètes ou de n'importe quel autre phénomène astronomique, et surtout qu'elle ne le fasse

pas mieux. En principe, nos besoins en matière de mesure du temps pourraient être satisfaits par une boîte noire située dans la cave d'un laboratoire d'étalons de mesure, égrenant ses secondes indépendamment de ce qui se passe dans les cieux. C'est d'ailleurs ce qui se passe aujourd'hui. Avant de voir comment on en est arrivé là, il est nécessaire de comprendre ce qui fait qu'une horloge est « bonne » ou non, ainsi que les conditions nécessaires pour qu'une horloge soit plus précise que la Terre.

### La qualité d'une horloge

N'importe quelle horloge peut être décomposée en deux parties : un oscillateur et un compteur (voir la figure 10). L'oscillateur – ou étalon de fréquence – est la partie qui fournit une vibration répétitive et périodique. Cela peut être un pendule oscillant, un balancier d'horloge, un cristal oscillant, les variations du 220 volts alternatif, ou les vibrations des électrons dans les atomes. Cela peut aussi être la rotation de la Terre ou les révolutions des planètes. Quelle qu'en soit la nature, et qu'il soit rapide ou lent, l'oscillateur fournit le phénomène rythmique et régulier qui entraîne l'horloge.

Toutefois, un oscillateur seul n'est pas une horloge, car il ne donne pas l'heure. Le métronome d'un musicien, par exemple, four-



10. Une horloge est constituée de deux parties : un oscillateur qui fournit un rythme régulier, et un compteur qui compte et affiche le nombre de cycles.

nit une battue régulière mais ne compte pas les temps. C'est un oscillateur, pas une horloge. Pour promouvoir un oscillateur au statut d'horloge, il faut un mécanisme – un compteur – qui tienne le compte des cycles et en affiche la valeur courante. Le compteur permet de savoir combien de cycles se sont écoulés, et ce dispositif constitue ce qui différencie un étalon de fréquence d'une véritable horloge. Dans une horloge ancienne, munie d'un mouvement d'horlogerie, l'oscillateur est un ressort remonté qui se balance de long en large. Le compteur est le mécanisme d'échappement qui marque les cycles et déplace les aiguilles pour donner l'heure. Dans une montre numérique, l'oscillateur est un cristal qui vibre et le compteur un circuit électronique qui présente l'heure selon un affichage numérique.

Si nous nous engageons dans la construction d'une horloge qui garde le temps plus précisément que la Terre, il nous faut un moyen de mesurer sa qualité. Les professionnels résumant celle-ci en deux termes – exactitude et stabilité. Son *exactitude* désigne sa capacité à donner l'heure juste. Une horloge peut être inexacte pour plusieurs raisons : soit son taux d'avancement est faux – elle avance ou retarde de plus en plus ; soit elle n'a tout simplement pas été mise à l'heure juste. La première raison est la plus importante. Ce qu'on l'appelle l'*exactitude en fréquence* mesure la capacité de l'horloge à fournir des intervalles de temps corrects, par exemple des secondes. Si le tic-tac reproduit bien des intervalles d'une seconde, on dit que l'horloge est exacte en fréquence. On utilise souvent comme mesure de cette exactitude le décalage de l'horloge au bout d'une journée de fonctionnement. Quand on met une horloge à l'heure exacte et qu'elle retarde d'une minute après une journée, elle est « exacte » à 1 minute par jour, soit 1 minute sur 1 440, c'est-à-dire 7 dix-millièmes (0,7 pour mille).

La *stabilité* d'une horloge est sa capacité à maintenir un taux d'avancement constant. Autrement dit, une horloge stable est celle qui, réglée pour battre la seconde, continuera à le faire sur une

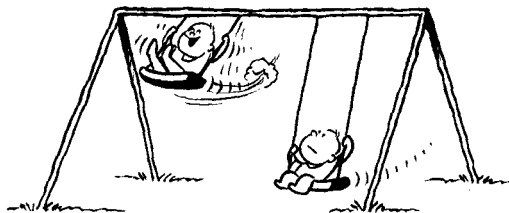
longue période. Une horloge qui retarde d'une minute par jour aujourd'hui, demain et durant un mois est qualifiée de stable, même si elle n'est pas très précise. Si par contre elle perd une minute le premier jour, deux le second, puis regagne une minute le troisième, elle n'est pas stable. Une horloge qui, chaque jour, mesure la journée à mieux que 2 minutes a une stabilité de 2 minutes par jour, soit 1,4 pour mille.

Quand on dispose d'une horloge stable, on peut souvent améliorer sa précision (son exactitude) en mesurant son taux d'avancement et, éventuellement, en le réglant à la bonne valeur. La stabilité est donc la plus importante des propriétés d'une horloge. Une horloge stable est aussi prédictible – une fois réglés l'heure et le taux d'avancement, on peut présumer qu'elle continuera à donner l'heure exacte.

### **Les pendules**

Jusque dans le courant du XX<sup>e</sup> siècle, les horloges les plus précises à usage scientifique utilisaient un pendule comme oscillateur. L'idée d'utiliser le balancement d'un objet pour mesurer et conserver le temps remonte à Galilée, aux alentours de 1580. On raconte que, alors qu'il était étudiant à Pise, il observa le balancement d'un lustre du *Duomo* et remarqua que la période d'oscillation ne dépendait que de la longueur de la chaîne d'où pendait le lustre, mais pas de la masse du lustre ni de l'amplitude des oscillations. La légende raconte qu'il a étalonné les périodes d'oscillation à partir des battements de son cœur. Cette histoire est, peut-être, plus crédible que celle où Galilée lâcha tout un assortiment d'objets du haut de la Tour Penchée de Pise.

Si vous avez étudié un peu de physique, vous ne pouvez pas avoir échappé au pendule. Dans sa forme la plus simple, il s'agit d'un objet lourd, suspendu au bout d'une ficelle ou d'une tige légère et libre d'osciller. Quand on écarte l'objet de sa position d'équilibre et qu'on le lâche, il oscille de part et d'autre pendant quelque



11. La période d'un pendule ne dépend que de sa longueur. Un pendule court oscille plus vite qu'un pendule long.

temps avant de ralentir puis de s'arrêter. Galilée a découvert que plus le pendule est long, plus la période d'oscillation l'est aussi, du moins dans le cas de petites oscillations. Galilée envisagea aussi la possibilité de conserver au pendule une période constante, en intervenant pour maintenir constante l'amplitude des oscillations. Le savant italien ne construisit pas lui-même d'horloge basée sur ce principe : à sa mort en 1642, son fils Vincenzo avait déjà repris le flambeau. Le musée des sciences de Londres abrite une horloge réalisée d'après les schémas de Galilée.

On attribue la première réalisation pratique d'une telle pendule au physicien néerlandais Christian Huygens, en 1656, ainsi que l'invention d'un mécanisme simple de correction des légères variations de la période d'oscillation avec l'amplitude. Huygens fut aussi le premier à employer un ressort remonté comme oscillateur d'une horloge.

L'avantage d'une telle horloge est que l'on peut ajuster son battement (sa période d'oscillation) simplement en faisant varier la longueur du pendule – un pendule court bat plus vite qu'un long. On peut donc ajuster la longueur d'un pendule pour qu'il batte exactement la seconde. En 1664, Huygens suggéra que l'on pourrait en profiter pour définir une nouvelle unité de longueur « universelle », reproductible partout à la surface de la Terre. Cette proposition fut reprise par l'Académie des Sciences française, dans les années

1790, lors de l'élaboration du système métrique. Même si ce n'est qu'une coïncidence, la longueur d'un pendule battant exactement la seconde à Paris est de 99,4 centimètres, valeur étonnamment proche de la nouvelle unité de longueur – le mètre – adoptée pour le système métrique.

Les pendules sont sensibles à tout changement de longueur. Si l'on souhaite disposer d'une horloge précise à mieux qu'une seconde par jour, il faut être sûr que la longueur du balancier ne varie pas de plus de 0,02 millimètre pour une période d'une seconde. Une telle variation se produit quotidiennement à cause de la dilatation et de la contraction dues aux variations de la température : quand il fait chaud, le pendule s'allonge et son rythme ralentit (l'horloge retarde) ; quand il fait froid, le contraire se produit. Les fabricants d'horloges ont imaginé plusieurs méthodes pour réduire ces variations de longueur, par exemple en combinant plusieurs métaux ; un des meilleurs matériaux est l'invar, un alliage de fer et de nickel, dont la dilatation thermique est très faible.

Il faut aussi tenir compte d'une influence plus subtile, celle de la gravité terrestre. Au sommet d'une montagne, la gravité est plus faible et une horloge battra plus lentement que sa jumelle située au niveau de la mer. De plus, la Terre est légèrement aplatie – les pôles sont plus proches du centre que l'équateur – et, en conséquence, la longueur d'un pendule battant exactement la seconde varie avec la latitude, même pour des horloges situées au niveau de la mer. Aux pôles, cette longueur vaut 99,6 centimètres, contre 99,1 à l'équateur. Cas plus extrême, sur la Lune, où la gravité est six fois plus faible que sur la Terre, cette longueur devrait être de 16 centimètres.

Enfin, les horloges à balancier nécessitent une petite entourage. Pour constituer un oscillateur stable et précis, leur pendule doit osciller librement. Or, cela est impossible puisque le balancier (le pendule) doit faire fonctionner le reste de l'horloge. Chaque oscillation doit faire avancer le mécanisme, ce qui retire un peu d'énergie au balancier. De plus, la friction et la résistance de l'air

jouent aussi un rôle, ce qui implique que le balancier doit recevoir un apport régulier d'énergie pour ne pas s'arrêter. Pour cela, on utilise souvent un système de poids s'abaissant lentement – comme ceux d'une horloge à coucou – mais la conception doit en être soignée si l'on veut que la période de balancement reste bien constante.

### **L'horloge de Shortt**

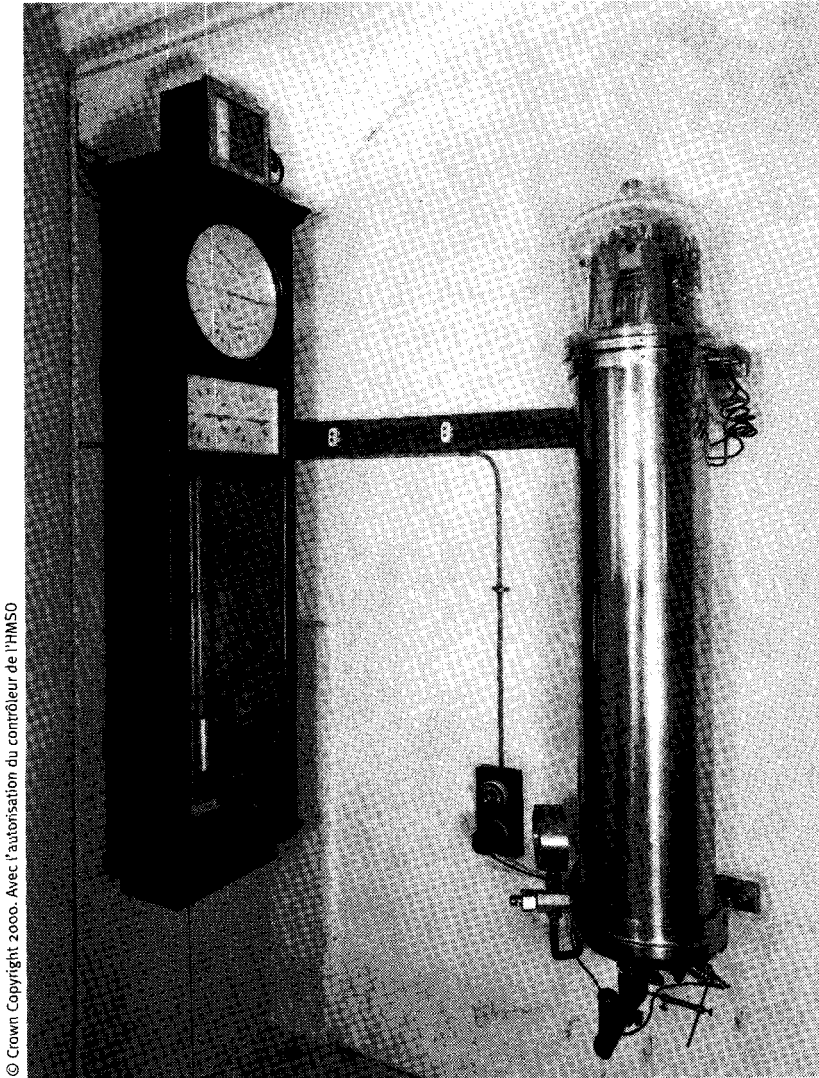
La meilleure horloge à balancier – en fait, la meilleure horloge mécanique toutes catégories – a été inventée par William Shortt, un ingénieur britannique. La première fut installée en 1921 à l'Observatoire Royal d'Édimbourg. L'horloge de Shortt disposait de deux balanciers. Le premier, qu'on appelle le maître, oscillait librement dans une enceinte sous vide d'air. Sa fonction était de synchroniser les oscillations du deuxième balancier, l'esclave, situé dans un meuble voisin. Toutes les 30 secondes, l'esclave envoyait un signal électrique permettant de donner une « pichenette » au maître. En retour, grâce à une liaison électromécanique, le maître « s'assurait » que l'esclave restait bien en phase avec lui (*voir la figure 12*).

Dans les années 1920-1930, on trouvait une horloge de Shortt dans presque chaque observatoire astronomique ; elle donnait l'heure avec une précision supérieure à 2 millisecondes par jour. Sur un an, un grand nombre d'entre elles ne s'écartaient pas de plus d'une seconde du Temps Universel UT – soit une stabilité d'une partie pour 30 millions. Les horloges de Shortt permirent de découvrir les minuscules irrégularités annuelles de la rotation terrestre.

En 1984, Pierre Boucheron mena une étude détaillée d'une horloge de Shortt qui avait « survécu » depuis 1932 dans la cave de l'Observatoire Naval des États-Unis (USNO). À l'aide de capteurs optiques modernes, il compara durant un mois sa stabilité à celles des horloges atomiques du même USNO. Durant cette période, la stabilité s'avéra supérieure à 200 microsecondes par jour, soit 2 à 3 parties par milliard. De plus, ses enregistrements montrèrent que



## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?



© Crown Copyright 2000. Avec l'autorisation du contrôleur de l'HMSO

12. L'horloge de Shortt à pendule libre fut le pilier de la mesure astronomique du temps dans les années 1920–1930. L'enceinte à vide située à droite contient le pendule « maître » qui oscille librement. Celui-ci transmet un signal électrique au pendule « esclave » situé dans le meuble de gauche. L'exemplaire photographié a fonctionné au *National Physical Laboratory* de Grande-Bretagne entre 1927 et 1959.

l'horloge était suffisamment précise pour être sensible aux déformations de l'écorce terrestre provoquées par les marées lunaire et solaire. En effet, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le Soleil et la Lune entraînent tous deux des marées, de la croûte terrestre comme des océans. La surface solide de la Terre se soulève et s'abaisse régulièrement d'une trentaine de centimètres. Comme la gravité dépend de la distance au centre de la Terre, ce faible effet de marée terrestre affecte aussi la période d'oscillation d'un pendule. Il en résulte une avance et un retard alternés, allant jusqu'à 150 microsecondes.

### **Les horloges à quartz**

Aussi impressionnantes fussent-elles, les horloges de Shortt furent détrônées par un type complètement nouveau de « garde-temps », les horloges à quartz. Sur la Terre, le quartz – principalement du dioxyde de silicium – est le second minéral par son abondance : c'est un constituant essentiel de nombreuses roches et sables. Quand il est pur, il se présente sous la forme de cristaux transparents d'aspect vitreux.

Le principe des oscillateurs à quartz n'est pas plus compliqué que celui d'une cloche. Quand on la heurte, une cloche sonne avec une note de musique bien précise. Cette note dépend de la forme et de la taille de la cloche, ainsi que du matériau qui la compose. Les oscillateurs à quartz comportent un cristal de quartz vibrant qui fournit une note de musique de très haute fréquence – en général inaudible car elle se situe dans le domaine des ultrasons. La fréquence de cette note dépend de la forme et de la taille de la fine tranche de cristal de quartz utilisée, et elle est extrêmement stable.

Ce sont les propriétés « piézoélectriques » du quartz qui le rendent si adapté à être utilisé comme pendule. Quand on comprime un cristal de quartz, une tension électrique apparaît entre ses faces. À l'inverse, si l'on soumet ses faces à une tension électrique, le cristal se contracte ou se dilate. Ainsi, un cristal de quartz qui vibre

à une certaine fréquence produit un signal électrique qui a exactement la même fréquence. Ce signal peut être redirigé sur le cristal pour le contraindre à osciller. Un tel oscillateur à cristal est donc constitué d'un cristal qui vibre comme une cloche, et d'un circuit électrique qui vibre en cadence avec lui.

La fréquence de vibration du cristal dépend de sa taille et de sa forme exacte. Par une découpe appropriée, on peut donc choisir la fréquence à laquelle le cristal va vibrer. Il est possible d'obtenir des fréquences allant de plusieurs milliers à plusieurs millions de vibrations par seconde. Si l'on veut que l'oscillateur pilote une horloge, ces hautes fréquences doivent être réduites pour que les séries d'oscillations puissent être comptées. Dans les horloges ou les montres à quartz modernes, la fréquence la plus souvent retenue est de 32 768 hertz (32 768 oscillations par seconde). Ce choix n'est pas dû au hasard, car ce nombre vaut  $2^{15}$  (2 puissance 15). En divisant 15 fois par 2 cette fréquence, à l'aide de circuits électroniques, on obtient une fréquence d'un coup par seconde.

Les premières horloges à cristal apparurent en 1927 et, à la fin des années 1930, elles avaient remplacé les horloges de Shortt comme étalon de fréquence dans les laboratoires. Comme la fréquence d'oscillation dépend de la coupe du cristal, on ne peut trouver deux horloges à quartz identiques. Elles sont également sensibles aux conditions ambiantes, en particulier aux variations de température. Les oscillateurs de facture récente comportent des microprocesseurs qui ajustent automatiquement la fréquence afin de compenser l'effet de ces variations de température.

Aujourd'hui, les horloges à quartz sont omniprésentes. Toutes les montres à pile, les réveils fixes ou de voyage ont des oscillateurs à quartz. Certaines sont si précises qu'elles n'ont pas besoin d'être réglées entre deux échanges de pile. Bien que les horloges à quartz aient été dépassées par les horloges atomiques pour les applications nécessitant la plus grande précision, elles constituent un maillon essentiel pour la conservation d'une heure précise.

### Les horloges atomiques

Les dictionnaires affirment que l'appellation d'« horloge atomique » remonterait à un article paru en 1938. En fait, l'idée d'utiliser des atomes pour mesurer le temps et conserver l'heure est plus ancienne, témoin l'édition de 1928 de l'annuaire des étalons de mesure du *National Bureau of Standards* (le laboratoire national de métrologie aux États-Unis) qui écrivait : « N'importe quelle radiation émise par un atome constitue le battement d'une horloge atomique... ».

Voilà plus d'un siècle que Sir William Thomson, plus connu sous le nom de Lord Kelvin, a observé que les atomes pouvaient fournir un étalon de fréquence. Dans un livre de cours publié en 1879, il écrit en effet : « Les découvertes récentes dues à la théorie cinétique des gaz ainsi qu'à l'analyse spectrale (appliquée en particulier à la lumière provenant des corps célestes) nous indiquent que la matière est faite d'étalons naturels tels que les atomes d'hydrogène ou de sodium, présents en quantités illimitées et aux propriétés physiques parfaitement identiques. L'intervalle de temps d'une vibration d'un atome de sodium selon l'un quelconque de ses modes de vibration est complètement indépendant de sa position dans l'univers, et il est probable que cette période reste la même tant que cet atome existe. »

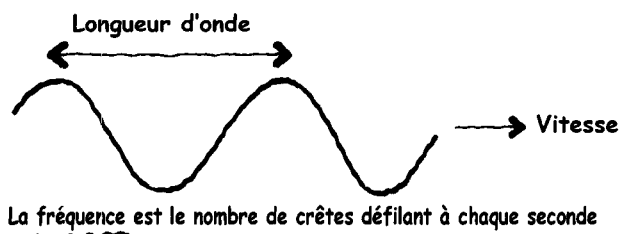
Qu'entendait Kelvin par « intervalle de temps d'une vibration » d'un atome de sodium ?

Depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle, les physiciens savaient que le spectre du Soleil est parsemé de raies sombres, dont certaines correspondent à des lignes brillantes de même longueur d'onde observées dans le spectre de certaines flammes. À Heidelberg, Robert Bunsen et Gustav Kirchhoff montrèrent que ces lignes étaient caractéristiques des éléments chimiques ; chaque élément produit sa propre famille de lignes, à des longueurs d'onde bien définies. Le sodium, par exemple, présente un doublet de lignes en lumière jaune à une longueur d'onde de 589 nanomètres. On observa que des raies sombres

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

apparaissaient à cette longueur d'onde quand de la vapeur de sodium absorbait une lumière blanche, alors que des raies lumineuses étaient visibles quand la même vapeur émettait de la lumière.

À cette époque, personne n'avait la moindre idée du processus d'émission ou d'absorption de la lumière par les atomes, ni pourquoi cette lumière apparaissait sous forme de lignes colorées si étroites ; mais on en déduisit assez rapidement que les atomes étaient dotés d'une certaine « vibration » caractéristique qui permettait d'émettre ou d'absorber de la lumière. Quand Kelvin écrivit l'ouvrage mentionné plus haut, on avait découvert que la lumière était une onde électromagnétique se déplaçant à une vitesse élevée, mais constante. Les lignes jaunes dans le spectre du sodium correspondaient donc à une oscillation, dans la structure de l'atome, de 500 000 milliards de fois par seconde.



13. Toute onde peut être décrite par sa longueur d'onde, sa fréquence et sa vitesse. La longueur d'onde est la distance entre deux crêtes ou deux creux consécutifs de l'onde. La longueur d'onde se mesure en mètre (m) ; pour les ondes lumineuses, on utilise plus fréquemment son sous-multiple, le nanomètre (nm), qui correspond à un milliardième de mètre. La fréquence de l'onde est le nombre de crêtes ou de creux qui défilent chaque seconde. L'unité de fréquence est le hertz (Hz), qui représente un cycle entier par seconde. Longueur d'onde et fréquence sont reliées à la vitesse de propagation de l'onde par la relation suivante :

Vitesse (en mètres par seconde) = longueur d'onde (en mètres) x fréquence (en hertz).

La vitesse des ondes électromagnétiques est très voisine de 300 millions de mètres par seconde.

Tous les atomes de sodium étaient identiques. Kelvin en déduisit que leur lumière jaune apparaîtrait toujours à la même fréquence fondamentale, définissant ainsi une période de vibration pouvant servir d'« étalon naturel » de temps. Et le sodium ne manquait pas ! Presque chaque fois que des chimistes regardaient le spectre lumineux d'une substance quelconque, il s'y trouvait un peu de sodium, dont la présence était trahie par le doublet de raies jaunes.

Toutefois, le destin du sodium n'était pas de finir comme étalon de temps. En 1860, au cours de leurs travaux de pionniers sur la spectroscopie, Bunsen et Kirchhoff découvrirent un nouveau métal. Celui-ci se caractérisait par une paire de lignes bleues, c'est pourquoi ils l'appelèrent césium, du mot latin signifiant « bleu-gris ». Le césium devait, bien plus tard, réaliser la prophétie de Kelvin quant à l'utilisation d'un étalon atomique de temps.

Le césium a des propriétés étonnantes. C'est un métal argenté, si mou qu'on le coupe comme du beurre. Quand on le plonge dans l'eau, il crépite violemment et se fragmente. Il fond à 28 degrés seulement ; si l'on pouvait le tenir dans la main, il y fondrait en un liquide doré et filerait entre les doigts. Attention, une telle expérience est vivement déconseillée à cause de sa grande réactivité avec l'humidité présente à la surface de la peau ! Parmi tous les atomes stables, celui du césium a le plus grand diamètre. Bien que ce soit un atome relativement lourd – son noyau comporte 133 protons et neutrons – il est deux fois et demi plus massif que le fer et 30 pour cent moins dense que l'aluminium.

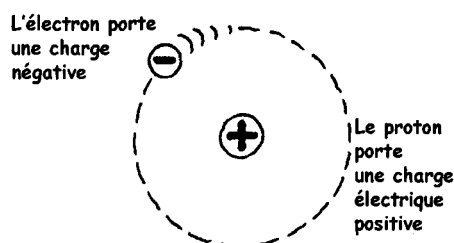
L'idée d'utiliser ce curieux métal au cœur d'une horloge atomique est attribuée au physicien américain Isidor Rabi, qui la proposa en 1945 lors d'une conférence devant la Société Américaine de Physique. L'année précédente, Rabi avait reçu le prix Nobel de physique pour ses travaux sur les propriétés magnétiques des noyaux atomiques, et il profita de cet exposé pour décrire les applications possibles de ses propres découvertes. Les traces écrites de cette conférence sont fragmentaires, mais les physiciens présents rapportent

qu'il y avait évoqué l'emploi de sa méthode des « jets atomiques » dans le but de construire une horloge atomique basée sur l'atome de césium. Nous décrirons plus loin, et en détail, le fonctionnement d'une horloge atomique au césium ; mais pour comprendre pourquoi le césium présente ici un intérêt particulier, il nous faut d'abord décrire un atome bien plus simple – le plus simple de tous, l'atome d'hydrogène.

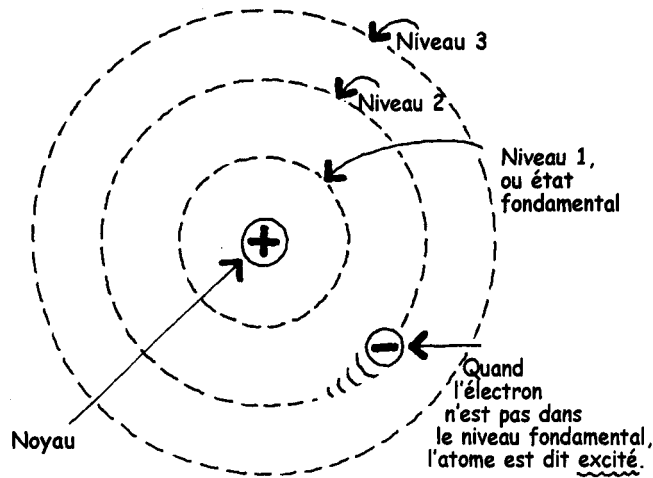
### L'hydrogène

Notre représentation de la structure de l'atome s'est éclaircie à partir des années 1920, avec les remarquables avancées de la théorie quantique. L'atome d'hydrogène est constitué d'un noyau chargé positivement et d'un électron de charge négative (voir la figure 14). Le noyau ne comporte qu'un proton, ce qui fait de l'hydrogène l'atome le plus simple qui existe.

Comme plus de 99,9 pour cent de la masse de l'atome réside dans son noyau, on peut considérer celui-ci comme immobile, avec l'électron qui orbite tout autour, à la façon d'une planète autour du Soleil. L'attraction électrique entre ces charges opposées assure la stabilité de l'atome ; elle joue ici le même rôle que la gravité dans le système solaire. Malgré tout, il ne faut pas pousser l'analogie trop loin, car la théorie quantique nous enseigne que les électrons se comportent non pas comme des planètes sur des orbites circulaires,



14. L'atome d'hydrogène comporte un proton et un électron.



15. L'électron n'occupe que certains niveaux d'énergie dans l'atome d'hydrogène. Il peut changer de niveau, vers le haut en absorbant un photon, ou vers le bas en émettant un photon. L'état où l'énergie est la plus basse est nommé niveau fondamental ; les autres états sont dits excités.

mais plutôt comme des sortes de nuages enveloppant le noyau. De plus, les électrons n'ont pas le « choix » de leur orbite : seules certaines d'entre elles sont autorisées, à des distances données du noyau.

Habituellement, l'électron de l'atome d'hydrogène se trouve dans l'orbite autorisée la plus proche du noyau, à 0,053 nanomètre de celui-ci en moyenne ; cette orbite correspond au niveau d'énergie le plus bas. Quand l'électron est sur cette orbite, on dit que l'atome est dans son état (on dit aussi niveau) fondamental. Si l'on fournit à l'électron une énergie suffisante, il peut « sauter » à un niveau supérieur. Il peut ensuite « redescendre » vers le niveau fondamental, en émettant un rayonnement électromagnétique dont l'énergie est précisément égale à celle qu'il avait absorbé en « montant ». Ce paquet d'énergie est dénommé photon. Les atomes n'émettent ou n'absorbent de rayonnement que par nombre entier de



photons d'énergie donnée ; ils ne peuvent le faire par une émission continue, comme celle d'une onde. L'énergie du photon est proportionnelle à la fréquence du rayonnement électromagnétique, et donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Ainsi, des photons de grande énergie sont associés à des fréquences plus élevées et des longueurs d'onde plus courtes que d'autres photons d'énergie plus basse (voir la figure 15).

Comme tous les atomes d'hydrogène sont identiques (à quelques exceptions près, que nous verrons plus loin), tous émettent et absorbent des photons identiques. Si vous avez déjà contemplé une photographie astronomique de nébuleuse – la nébuleuse d'Orion par exemple – vous aurez probablement remarqué des zones rouge-rosé. Cette lueur est due à des photons émis par des atomes d'hydrogène, lors de la « chute » d'un électron du troisième niveau d'énergie au second. Ces photons rouges ont une fréquence donnée, identique pour tous les atomes d'hydrogène. En principe, nous pourrions donc chauffer des atomes d'hydrogène jusqu'à ce qu'ils rayonnent ; puis, en suivant la suggestion de Kelvin, nous utiliserions cette lumière rouge comme étalon de fréquence. Cela n'en ferait pas pour autant une horloge, constituée d'un oscillateur et d'un compteur de cycles. L'atome d'hydrogène jouerait naturellement le rôle de l'oscillateur, mais où trouver le compteur ? Ces photons rouges ont une fréquence supérieure à  $10^{14}$  hertz, comme d'ailleurs tous les photons de lumière visible émis par n'importe quel atome, et pas seulement par l'hydrogène. Comment diable peut-on suivre et compter les cycles d'une horloge qui fait  $10^{14}$  tic-tac par seconde ?

Tel était le problème des physiciens dans les années 1940, quand ils s'attelèrent à la réalisation d'une horloge atomique. La technologie de l'époque n'offrait aucun moyen d'utiliser la lumière visible comme étalon de fréquence, car il était impossible de *compter* les oscillations. Même de nos jours, ce domaine se situe à la frontière de ce que l'on sait faire, et nous y reviendrons au chapitre 8. Il

ne restait plus qu'à trouver un atome qui ait le bon goût d'émettre et d'absorber des photons d'une fréquence bien plus basse, plus « maniable » en quelque sorte, ce qui amena les scientifiques à se tourner vers les ondes radio.

Il est possible d'obtenir des ondes radio à partir des atomes, y compris de l'atome d'hydrogène. En effet, l'électron, comme le proton, sont magnétiques ; on peut les imaginer avec un pôle nord et un pôle sud, comme de minuscules aimants. Dans l'atome d'hydrogène, il n'y a que deux orientations relatives possibles de ces deux aimants : soit ils pointent dans la même direction, soit ils pointent dans des directions exactement opposées (on dit aussi qu'ils sont parallèles ou anti-parallèles). Dans le premier cas (parallèles), les deux pôles nord pointent dans la même direction et les deux aimants se repoussent, ce qui éloigne légèrement l'électron du noyau. Dans le second cas (anti-parallèles), les deux aimants s'attirent, et l'électron se rapproche quelque peu du noyau (*voir la figure 16*).

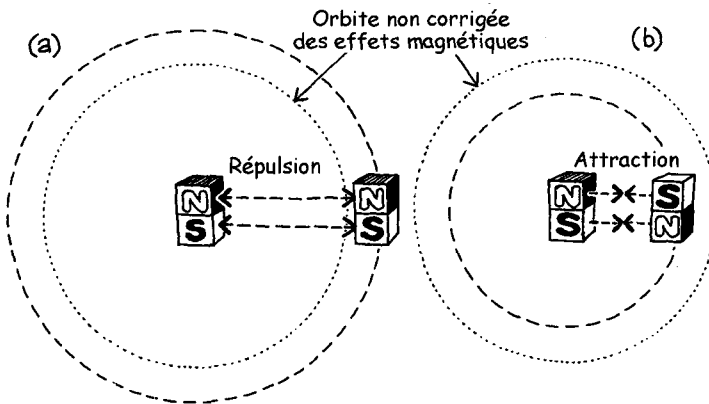
Donc, suivant l'orientation relative des aimants, l'électron de l'hydrogène peut se trouver dans deux états d'énergie voisins, même dans l'état fondamental. Cette sous-structure du niveau fondamental est connue sous le nom de structure « hyperfine ». Quand l'orientation relative des deux aimants que sont le proton et l'électron passe de parallèle à antiparallèle, l'électron passe d'un état hyperfin dans l'autre. L'atome émet alors un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie entre ces deux états hyperfins, ce qui correspond à une longueur d'onde de 21 centimètres, ou une fréquence de 1 420 mégahertz.

Cette transition hyperfine est bien connue des radioastronomes, car elle constitue le principal moyen de détection des nuages d'atomes d'hydrogène dans la Voie Lactée ou dans d'autres galaxies. Cette émission à 21 centimètres, prédite par l'astrophysicien néerlandais Henk van de Hulst en 1944, fut observée pour la première fois en 1951 par des astronomes américains et australiens.

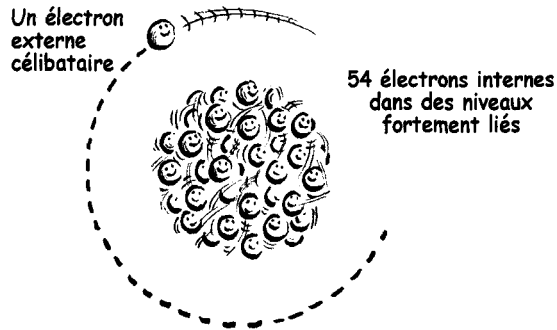
### Retour au césium

L'hydrogène est le seul atome neutre comportant un seul électron, mais d'autres éléments chimiques lui ressemblent fort. Les métaux dits alcalins possèdent un électron qui se singularise par son orbite plus éloignée du noyau que tous les autres électrons de l'atome ; cet électron est donc moins fortement lié au noyau que ses congénères. Les métaux alcalins sont, par ordre de masse atomique croissante, le lithium, le sodium, le potassium, le rubidium, le césium et le francium (voir la figure 17).

Les autres électrons, ceux des niveaux internes, sont tous appariés, de façon que l'aimant d'un électron d'une paire soit antiparallèle à celui de l'autre électron de la paire. Ainsi, l'effet magnétique global de tous les électrons appariés est nul. En conséquence, les seuls effets magnétiques dans les atomes alcalins sont dus au noyau et à l'é-



16. Le noyau ainsi que l'électron de l'hydrogène se comportent comme de minuscules aimants. En (a), les aimants sont alignés dans la même direction et la force de répulsion entre eux éloigne un peu l'électron du noyau. En (b), c'est le contraire : l'aimant de l'électron pointe en sens opposé, et les deux aimants s'attirent, ce qui rapproche l'électron du noyau. La très faible différence d'énergie entre ces deux orbites correspond à un photon dont la longueur d'onde est de 21 centimètres, et la fréquence de 1 420 mégahertz, dans le domaine des ondes radio.



17. La totalité des 55 électrons que comporte le césium sont fortement liés au noyau, sauf un ; ces 54 électrons internes ne participent en général pas aux réactions. L'électron externe, quant à lui, est plus faiblement lié et il est responsable des propriétés particulières du césium, celles qui le rendent presque indispensable à la réalisation d'étalons de fréquence.

lectron externe. C'est pour cette raison que cet électron « célibataire » se comporte à de nombreux égards comme l'électron unique de l'hydrogène ; en particulier, il donne lieu à une paire d'états hyperfins, dont l'origine magnétique est la même, et à des transitions hyperfines entre ces deux états, tout comme dans l'hydrogène.

Parmi tous les atomes alcalins, le césium semble le plus favorable à la réalisation d'une horloge atomique. Sa transition hyperfine a une fréquence de 9 193 mégahertz, soit une « vibration » proche de 10 milliards d'oscillations par seconde. La fréquence de cette « transition d'horloge » est la plus élevée de tous les métaux alcalins et elle peut ainsi être mesurée bien plus précisément que celle des autres alcalins. La longueur d'onde correspondante est de 3,26 centimètres, en plein milieu du spectre des ondes radio dites micro-ondes. Ces longueurs d'onde sont utilisées dans les radars et, à la fin des années 1940, de nombreux radars, surplus de la guerre, étaient disponibles, à condition qu'on veuille bien leur trouver un usage.

Tous les atomes de césium dans la Nature sont identiques. En revanche, un atome d'hydrogène sur 7 000 environ a un noyau

composé d'un proton *et* d'un neutron. Cette forme particulière de l'hydrogène – on parle d'« isotope » – se nomme le deutérium, et sa masse est le double de celle de l'hydrogène ordinaire. La plupart des éléments chimiques ont ainsi plusieurs isotopes. Le chlore, par exemple, est fait de 75 pour cent d'atomes ayant 18 neutrons et de 25 pour cent qui en possèdent 20. Parmi les métaux alcalins, seuls le sodium et le césium se présentent sous une forme pure, avec un seul isotope. Chaque atome stable de césium dans la Nature comporte 55 protons et 78 neutrons, et a donc une masse atomique de 133. Cela signifie que chaque atome de césium émet ou absorbe, lors des transitions hyperfines, des photons ayant toujours la même fréquence.

Le césium présente d'autres avantages. Sa température de fusion très basse implique qu'il est facile de le faire passer à l'état de vapeur. Une fois vaporisé, sa masse atomique élevée garantit qu'il se déplace à une vitesse plus faible que celle des molécules d'air, d'environ la moitié ; nous verrons plus loin en quoi de faibles vitesses constituent un avantage. Enfin, et à l'exception de son frère plus massif le francium, l'atome de césium est le plus grand de tous les atomes. Malgré sa taille plus importante, le francium est disqualifié pour la bonne raison qu'il n'en existe aucun isotope stable – l'isotope le moins instable du francium, fortement radioactif, a une durée de vie inférieure à la demi-heure. Conséquence assez directe de cette grande taille, l'électron externe du césium est faiblement lié. Il est même plus facile d'extraire un électron du césium que de n'importe quel autre atome stable, ce qui facilite sa détection.

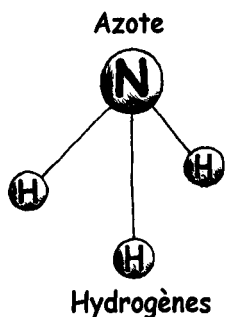
Pour toutes ces raisons, après le discours de Rabi en 1945, les physiciens comprirent que la réalisation d'une horloge atomique passait par l'utilisation des propriétés singulières du césium.

### **L'horloge à ammoniac**

Pourtant, le destin fit que la première horloge atomique n'employa pas de césium du tout. En fait, elle n'utilisa aucun atome simple,

mais une molécule. Harold Lyons, physicien du NBS américain (*National Bureau of Standards*, ou bureau national de métrologie, situé à l'époque dans la ville de Washington), choisit de concevoir une horloge fondée sur la molécule d'ammoniac.

Cette molécule est composée de quatre atomes, un d'azote et trois d'hydrogène. On peut la représenter comme un atome d'azote situé au sommet d'une pyramide à base triangulaire, dont les trois hydrogènes occupent chacun un angle. Il existe deux formes de cette molécule ; une pyramide « normale » et une pyramide « inversée », où l'atome d'azote est au-dessous de la base constituée par les atomes d'hydrogène. Chaque molécule d'ammoniac peut se trouver alternativement dans l'une ou l'autre de ces deux configurations, par « traversée » de l'atome d'azote au travers du triangle d'atomes d'hydrogène (voir la figure 18). Pour des raisons liées à la théorie quantique, et dans lesquelles nous n'entrerons pas, la molécule d'ammoniac possède deux états d'énergies voisines, combinaisons des précédents : elle peut passer de l'un à l'autre sous l'influence d'un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie des deux niveaux. Cette différence d'énergie correspond à une fréquence de 23 870 mégahertz, soit une longueur d'onde de 1,26 centimètre. Comme dans le cas de la transition hyperfine du césium, cette longueur d'onde se trouve dans la zone des micro-ondes, utilisées dans



18. La molécule d'ammoniac est faite d'un atome d'azote lié à trois atomes d'hydrogène ; elle a la forme d'un tétraèdre. L'atome d'azote est capable de « sauter » à travers la base des trois hydrogènes, mais, selon la théorie quantique, il existe deux façons de le faire, correspondant à deux états distincts de la molécule d'ammoniac. Quand on expose l'ammoniac à des micro-ondes correctement ajustées en fréquence, la molécule passe d'un de ces états à l'autre.

les radars que Lyons et ses collègues avaient employés durant la guerre. Le NBS avait pour mission de réaliser des étalons de fréquence dans le domaine des micro-ondes, pour aider au développement de radars fonctionnant avec des ondes de fréquences de plus en plus élevées. À cette époque, la transition « miroir » de l'ammoniac était déjà connue, car elle avait été étudiée depuis le début des années 1930.

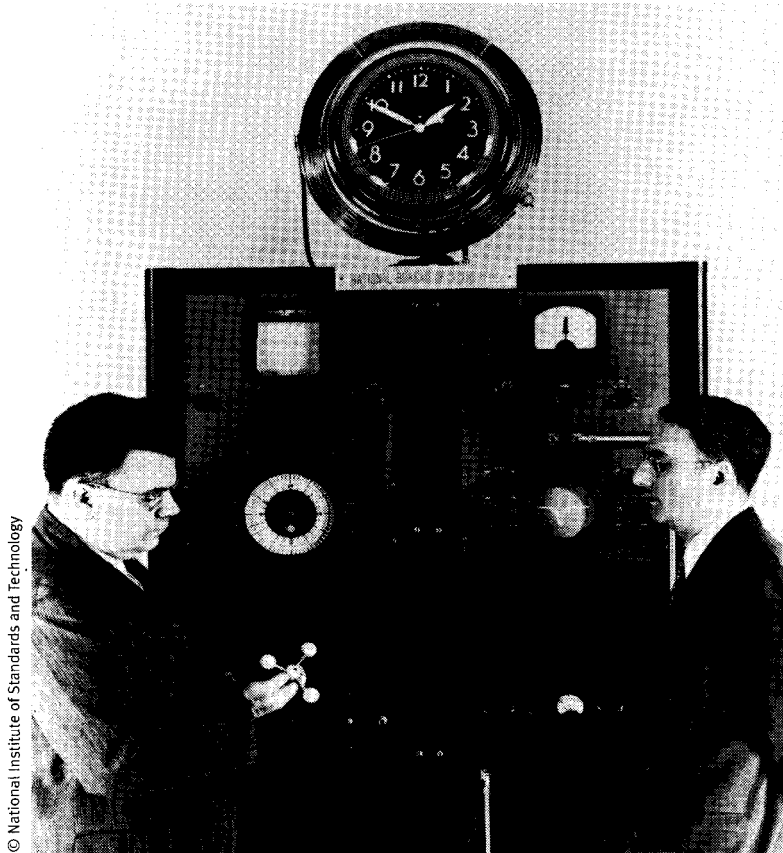
L'ammoniac est un gaz qui comporte habituellement un mélange des deux états de la molécule en quantités égales, avec des transitions incessantes entre ces deux états. Toutefois, si l'on est capable d'envoyer un faisceau de micro-ondes accordé sur la bonne fréquence à travers le gaz, la moitié des molécules situées sur le niveau d'énergie le plus bas absorberont ces photons micro-ondes et monteront sur le second niveau, plus élevé.

Au cœur de l'horloge du NBS, se trouvait un tuyau de cuivre rectangulaire de 10 mètres de long (un « guide d'ondes ») rempli de gaz d'ammoniac sous une faible pression. Les micro-ondes étaient envoyées à une extrémité du tuyau, et un récepteur les détectait à l'autre bout. Quand la fréquence des micro-ondes était différente de la fréquence d'inversion, les ondes traversaient le gaz sans encombre. Au contraire, quand la fréquence choisie était voisine de cette fréquence d'inversion, le gaz absorbait des photons micro-ondes et le récepteur enregistrerait une baisse de l'intensité des ondes ayant traversé le tuyau. Grâce à cette méthode, il était possible de régler exactement la fréquence des micro-ondes pour que l'absorption soit maximale. Pour ce réglage, la fréquence des micro-ondes envoyées par l'émetteur était égale à la fréquence d'inversion, soit 23 870 mégahertz.

Il faut souligner que cette fréquence d'inversion n'a rien à voir avec la manière dont on a construit le dispositif ; elle ne dépend que des propriétés intrinsèques de la molécule d'ammoniac. Au contraire de l'horloge à balancier, dont la période dépend de la longueur exacte du pendule, ou de l'horloge à quartz, dont la période dépend de la façon dont on a taillé le cristal, le battement d'une horloge

atomique ne dépend que de la nature des atomes ou des molécules utilisés pour réaliser l'étalon de fréquence.

En 1949, cette horloge excita la curiosité du grand public quand on la présenta pour la première fois, peut-être était-ce parce qu'elle semblait « faite pour le rôle » (voir la figure 19). Lyons avait



© National Institute of Standards and Technology

19. La première horloge atomique, dévoilée au NBS, le bureau américain des étalons de mesure, en 1949. Elle fonctionnait grâce à l'absorption d'ondes radio par de l'ammoniac gazeux à la fréquence de 23 870 mégahertz. Le directeur du NBS, Edward Condon (à gauche) contemple un modèle de la molécule d'ammoniac, sous le regard intéressé de l'inventeur de l'horloge, Harold Lyons.



installé l'équipement dans deux étagères d'apparence ordinaire, mais au sommet trônait le guide d'onde en plaqué or, enroulé autour d'une horloge électrique banale. Grâce aux journalistes, ce guide d'onde devint immédiatement une célébrité.

Malheureusement, cette horloge ne tint pas ses promesses. Une version améliorée atteignit une stabilité de vingt parties par milliard, mais ce résultat était à peine supérieur à celui des horloges à quartz, ou de la rotation terrestre. Lors de sa présentation, l'horloge ne pouvait fonctionner que pendant quelques heures ; cette durée fut ensuite portée à quelques jours.

La limitation principale de l'horloge à ammoniac était que la gamme de fréquences d'absorption était trop large. Au lieu d'absorber les micro-ondes à la fréquence précise de l'inversion, les molécules absorbaient une vaste plage de fréquences. Cela était dû à l'effet Doppler (voir la figure 20). À température ambiante, les molécules de gaz se précipitent dans toutes les directions à plusieurs centaines de mètres par seconde. Si, à l'échelle moléculaire, l'on pouvait observer l'intérieur du guide d'onde de l'horloge à ammoniac, on verrait à peu près la moitié des molécules s'éloignant rapidement de l'observateur, tandis que l'autre moitié se rapprocheraient. Celles qui iraient à contre-courant des micro-ondes percevraient une fréquence plus élevée (on dit aussi, improprement, décalée vers le bleu). Parallèlement, les molécules allant dans le même sens que l'onde verraient une fréquence plus basse (« décalée vers le rouge »). En conséquence, même si le faisceau de micro-ondes est précisément ajusté à la fréquence d'inversion, de nombreuses molécules n'absorberont pas ces micro-ondes parce qu'elles verront une fréquence trop haute, ou trop basse. De plus, si la fréquence radio est légèrement différente de la fréquence d'inversion, quelques molécules absorberont tout de même les micro-ondes car elles auront une vitesse telle que cela sera possible. Le résultat net est qu'une bande de fréquence trop large est susceptible d'être absorbée autour de la fréquence d'inversion, et cela réduit d'autant la précision de l'étalon de fré-

quence. L'usage de l'ammoniac dans la réalisation d'une horloge atomique n'est pas en cause, c'est le mouvement des molécules qui dégrade la précision du dispositif.

### Des jets de césium

Même si elle s'avéra être un cul-de-sac technologique, il ne fait pas de doute que l'horloge à ammoniac du NBS fut la première horloge atomique – à moins qu'il ne faille parler d'horloge moléculaire.

Les ondes sonores émises par une source qui s'éloigne sont « étirées » et perçues comme un son plus grave (fréquence plus basse)



Les ondes sonores émises par une source au repos sont perçues à la bonne hauteur



Les ondes sonores émises par une source qui s'approche sont « comprimées » et perçues comme plus aiguës (fréquence plus élevée)



20. L'effet Doppler. Christian Doppler, physicien autrichien, découvrit en 1842 que la fréquence des ondes sonores perçues dépend de la vitesse relative de l'auditeur et de la source du signal sonore. La sirène d'une ambulance, par exemple, semble émettre un son (une fréquence) plus aigu quand elle s'approche de nous que quand elle s'éloigne. Cela est dû à une sorte de compression des ondes sonores lors de l'approche, et à leur étalement quand elle s'éloigne. Doppler a montré que la variation relative de fréquence (et aussi de longueur d'onde) est proportionnelle à la vitesse relative de l'auditeur et de la source sonore. Plus cette vitesse est grande, plus la fréquence varie. Cet « effet Doppler » est présent pour toutes les sortes d'ondes, y compris les ondes électromagnétiques. Dans le cas de la lumière visible, on dit qu'elle est « décalée vers le rouge » quand sa longueur d'onde s'accroît, et « décalée vers le bleu » quand elle diminue.

Comme Rabi l'avait prévu, le chemin vers des horloges atomiques précises devait passer par l'emploi du césium. Il est difficile de savoir à qui revient le mérite d'avoir construit la première horloge atomique à césium, à la fois parce que trois horloges peuvent prétendre à ce titre et aussi parce que l'appellation même d'« horloge atomique » est sujette à interprétation.

En 1948, Lyons avait chargé Polykarp Kusch, un collègue de Rabi à l'université Columbia de New York, d'étudier la possibilité de construire une horloge à césium pour le NBS. Kusch (futur lauréat du prix Nobel) en présenta le plan l'année suivante et, en 1951, l'horloge expérimentale à jet de césium du NBS mesurait ses premières secondes. L'appareillage était capricieux, et les progrès furent peu nombreux après 1952, en partie à cause de réductions des budgets. En 1954, l'appareillage fut démonté à cause du déménagement du groupe de Lyons de Washington vers les nouveaux locaux de la division « Temps et Fréquence » du NBS, à Boulder dans l'État du Colorado.

Pendant que le programme de recherche du NBS piétinait, un autre chapitre de l'histoire s'écrivait au MIT (Institut de Technologie du Massachusetts, à Boston, États-Unis). Jerrold Zacharias, un physicien qui s'était illustré par ses travaux sur le radar pendant la guerre, essaya de fabriquer une horloge à jet de césium qui soit non seulement transportable, mais aussi réalisable en série et donc commercialisable. Voilà une ambition élevée, alors qu'aucun prototype d'un tel engin n'avait encore été réalisé. Pourtant, à l'été 1954, le prototype d'une horloge à jet de césium fonctionnait bel et bien au MIT ; il fallut encore deux ans avant qu'une horloge proprement dite soit disponible.

L'avancée décisive vint de là où personne ne l'attendait, dans un petit groupe sans grande expérience sur le sujet, dirigé par Louis Essen au NPL, le laboratoire de métrologie britannique équivalent du NBS américain. Après son doctorat, Essen avait rejoint le NPL en 1929 pour travailler sur les étalons de fréquence au sein du

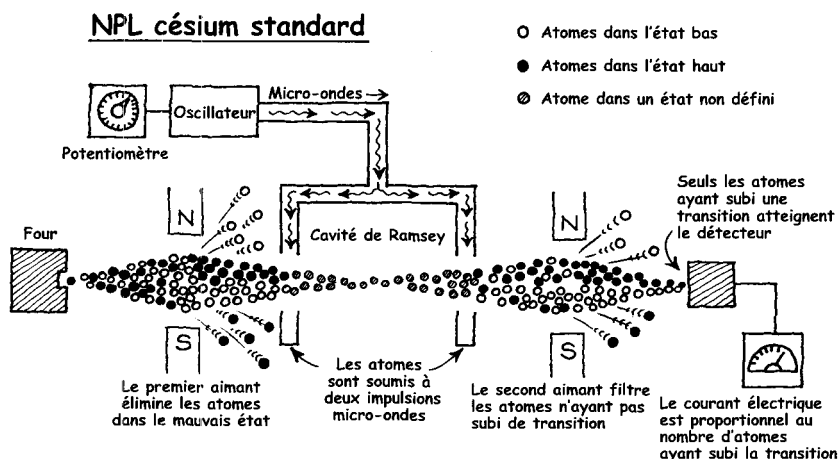
Département d'Électricité. En 1938, il avait amélioré les oscillateurs à quartz à partir d'un cristal taillé en forme d'anneau, dénommé depuis étalon de fréquence à « anneau d'Essen ». Pendant la guerre, Essen travailla sur les micro-ondes et utilisa le savoir acquis pour mettre au point une nouvelle méthode de mesure de la vitesse de propagation de la lumière. La valeur qu'il mesura – 299 792,5 kilomètres par seconde – fut présentée en 1950 ; elle était plus élevée de 16 kilomètres par seconde que la valeur admise à l'époque, mais quand on la compare à la valeur moderne de 299 792,458 kilomètres par seconde, elle fait plutôt bonne figure.

En plus de son expérience acquise sur la conservation précise du temps, sur la technologie des micro-ondes et sur les mesures fines et méticuleuses, Essen s'était tenu informé des progrès sur les horloges atomiques au NBS et au MIT. Il avait vu l'horloge à ammoniac (et y avait consacré un article de vulgarisation dans la revue *Practical Mechanics*) ; il avait rendu visite à ses principaux collègues américains travaillant sur les étalons de fréquence atomiques. Comme eux, il savait qu'on ne pourrait aller de l'avant qu'avec les horloges à césium proposées par Rabi. Au début 1953, de retour des États-Unis, il était déterminé à construire un étalon de fréquence au césium au NPL. Doté d'un modeste budget, il se mit au travail avec son collègue John « Jack » Parry. Bien qu'aucun d'eux ne soit un spécialiste des jets d'atomes, ils étaient des expérimentateurs adroits et, en 1955, l'étalon au césium du NPL fonctionnait.

La figure 21 montre le principe de l'étalon de fréquence à jet de césium du NPL. Celui-ci était fondé sur le schéma développé par Kusch, lui-même inspiré par la vision de Rabi. Comme les horloges atomiques à jet de césium qui ont été construites par la suite – du moins jusqu'aux années 1990 – fonctionnent toutes sur le même principe, nous allons maintenant décrire son fonctionnement en détail.

L'objectif est d'accorder les vibrations d'un oscillateur à quartz ultra-stable sur la fréquence de transition hyperfine du césium, et de n'en plus bouger. Tous les éléments du système sont placés dans une

enceinte à vide, afin que les molécules d'air résiduelles n'empêchent pas le faisceau de césium de se propager en ligne droite. Sur la gauche, on voit un petit four électrique contenant moins d'un gramme de césium, que l'on chauffe à 200 degrés. Les atomes de césium ainsi chauffés jaillissent d'une étroite fente percée dans l'enceinte du four avec une vitesse d'environ 200 mètres par seconde. C'est ce qu'on appelle le « jet » d'atomes de césium.



21. Le principe de l'étalon au césium du NPL. Les atomes de césium émergent du four en un jet à environ 200 mètres par seconde. Il s'agit d'un mélange égal d'atomes dans l'état hyperfin haut (points noirs) et bas (cercles blancs). Dans le premier aimant, les atomes qui sont dans le bon état sont sélectionnés par focalisation en un faisceau, alors que les autres sont écartés. Le faisceau traverse ensuite les bras d'une cavité de Ramsey, dans lesquels il est exposé à deux reprises à des micro-ondes dont la fréquence est voisine de la fréquence de transition. À la sortie de la cavité, le faisceau contient des atomes qui ont basculé dans l'état opposé, et d'autres qui ne l'ont pas fait. Ces derniers sont à leur tour défléchis hors du faisceau à l'aide du second aimant, alors que les atomes ayant subi une transition sont dirigés vers le détecteur. Plus nombreux sont les atomes qui y sont détectés, plus la fréquence des micro-ondes est proche d'une valeur de 9 192 631 770 hertz. L'étalon du NPL mesurait 1 mètre 20 du four au détecteur, l'espacement des pôles de l'aimant n'était que de 2 millimètres et les angles de déflexion ne dépassaient pas un demi-degré.

Ces atomes forment un mélange ; environ la moitié d'entre eux est dans l'état hyperfin « bas » et l'autre moitié est dans l'état hyperfin « haut ». Il faut tout d'abord les séparer. On y parvient en faisant passer le jet à travers un aimant à la forme soigneusement étudiée, selon une technique inventée par Otto Stern et Walther Gerlach au début des années 1920, dans le but d'étudier la structure atomique. Les atomes de césium ont des propriétés magnétiques ; ils sont donc déviés par le champ magnétique de l'aimant selon leur état d'énergie. Ils en émergent dans deux directions légèrement différentes, une pour l'état d'énergie plus basse, l'autre pour l'état de plus haute énergie. C'est la géométrie du dispositif qui garantit que les atomes situés dans la partie haute du faisceau sont dans un état, alors que ceux qui sont en bas sont dans l'autre.

Les atomes sont alors prêts à subir une transition. Ces atomes de césium sont comparables à des récepteurs radio au réglage particulièrement fin. Ils ignorent toute onde de la mauvaise fréquence, mais répondent fortement aux ondes de la bonne fréquence, soit 9 193 mégahertz. Un atome dans l'état « bas » qui rencontre un photon de la bonne fréquence, l'absorbe et se retrouve dans l'état « haut ». À l'inverse, un atome dans l'état « haut » rencontrant un bon photon va émettre un photon identique pour se retrouver dans l'état « bas ». Dans chaque cas, c'est l'électron externe du césium qui voit son axe des pôles magnétiques renversé par l'interaction avec les micro-ondes, ce qui change l'état de l'atome de césium.

Dans l'idée originale de Rabi, les atomes traversent un long tube où ils rencontrent les micro-ondes. Plus ils y restent longtemps, plus précise sera la détermination de la fréquence de transition. L'appareillage du NPL, suivant en cela les idées du groupe du NBS, utilisa une autre méthode conçue en 1949 par Norman Ramsey, de l'université de Harvard ; 40 ans plus tard, cette méthode valut le prix Nobel à Ramsey.

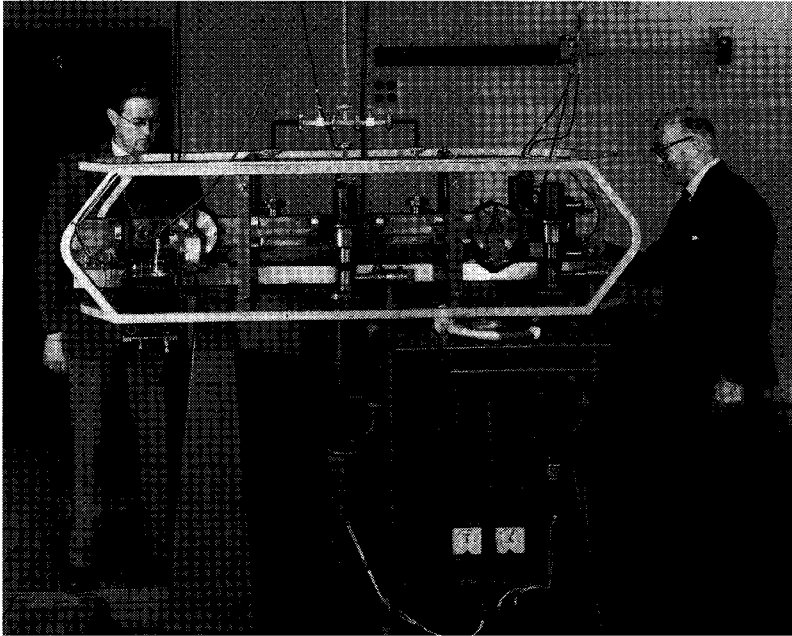
Ramsey avait remarqué qu'il n'y avait nul besoin de faire passer les atomes par un long tube rempli de micro-ondes. On pouvait

obtenir la transition aussi efficacement en soumettant les atomes à deux brèves impulsions de micro-ondes, plutôt qu'à une exposition prolongée. Le bénéfice est double, car cette méthode simplifie la construction de l'horloge – il est difficile de contrôler l'exposition dans un long tube – et elle accroît sa sensibilité. Dans l'horloge du NPL, ainsi que dans celles qui ont suivi, les micro-ondes sont envoyées dans un guide d'onde – aujourd'hui dénommé cavité de Ramsey – qui se divise en deux bras, en forme de U renversé. Le jet de césium passe d'abord au travers d'un trou percé dans le premier bras du U, puis dans un trou identique percé dans le second bras. Lors de chacun de ces deux passages, le jet reçoit une impulsion de micro-ondes identique. Si la fréquence des micro-ondes est bien accordée sur la fréquence de transition, la première impulsion met les atomes dans un état fantomatique, une superposition quantique des deux états hyperfins, et la deuxième impulsion finit le travail en les expédiant dans l'état opposé. La précision avec laquelle la fréquence de transition est définie est d'autant meilleure que l'intervalle de temps que les atomes passent dans leur « limbe quantique » entre les deux impulsions micro-onde est grand.

Les atomes filent tous plus ou moins dans la même direction, et ils rencontrent les impulsions micro-onde à angle droit ; les micro-ondes « cognent » donc les atomes de côté plutôt que de face. Cela constitue un énorme avantage, car le déplacement Doppler de la longueur d'onde vue par les atomes n'existe pas dans ce cas ; au contraire de ce qui se passe pour l'horloge à ammoniac, la fréquence de transition est et demeure parfaitement définie.

Quand il émerge enfin du second bras de la cavité de Ramsey, le jet comporte à nouveau deux types d'atomes de césium : ceux qui ont subi une transition, et ceux qui n'en ont pas subi. Un deuxième filtre magnétique les sépare alors, exactement comme la première fois. La géométrie de l'appareil est conçue de telle façon que les atomes qui ont subi une transition arrivent sur le détecteur, tandis que les autres, inintéressants, sombrent dans l'oubli.

© Crown Copyright 2000. Avec l'autorisation du contrôleur de l'HMSO



22. Louis Essen (à droite) et Jack Parry avec la première horloge à césium opérationnelle. Entre eux, la longue boîte est la chambre à faisceau qui contient les éléments du dispositif. Les atomes de césium émergent d'un four situé à droite pour se diriger vers le détecteur situé à gauche. Les objets de forme circulaire sont les enroulements des deux aimants de déflexion. Les micro-ondes entrent par le guide d'onde vertical situé vers le sommet de l'image, avant de passer dans la cavité de Ramsey, en forme de U renversé, qui les conduit jusqu'au faisceau. Le cadre blanc contient des enroulements de fils électriques permettant de blinder l'équipement des champs magnétiques externes. Les trois cylindres verticaux à l'intérieur du cadre sont des pompes à vide.

Le détecteur est simple : il s'agit d'un fil métallique chauffé au rouge, face à une plaque de métal. Souvenez-vous que l'électron externe du césium, celui qui lui confère ses propriétés magnétiques, est très faiblement lié au reste de l'atome. La température du fil est suffisante pour arracher cet électron, tout en laissant l'atome lui-même – devenu un ion positif – rebondir vers la plaque métallique chargée négativement, où il est capturé. Un courant électrique



parcourt donc cette plaque, dont l'intensité est proportionnelle au nombre d'atomes ayant subi la transition hyperfine au travers de l'appareillage.

Comme pour l'horloge à ammoniac, l'astuce consiste à ajuster la fréquence de l'émetteur de micro-onde qui alimente la cavité jusqu'à ce que le courant dans le détecteur présente un maximum (on parle aussi de « résonance »). À ce moment, on sait que le nombre d'atomes ayant subi la transition est maximal ; cela ne peut se produire que lorsque la fréquence micro-onde est égale à la fréquence de transition. (En fait, dans les premiers temps, ce sont les atomes n'ayant pas basculé qui étaient détectés dans l'horloge du NPL, et le courant était minimal lorsque l'accord en fréquence était optimal. Cela fut modifié par la suite.) Dans les horloges atomiques qui suivirent, la fréquence micro-onde était automatiquement ajustée sur la fréquence de transition du césium ; dans le premier étalon du NPL, cette opération était encore manuelle.

Une fois l'étalon opérationnel (*voir la figure 22*), l'une des premières tâches d'Essen et Parry fut de mesurer la longueur de la seconde par rapport à la période de transition du césium (cette période est l'inverse de la fréquence de transition). Leur résultat fut le suivant : une seconde – la seconde de temps solaire moyen, fournie et radiodiffusée par l'observatoire royal de Greenwich – contient 9 192 631 830 cycles de la fréquence de transition hyperfine du césium, avec une incertitude de plus ou moins 10 cycles. À l'époque, aucune autre grandeur physique n'avait été mesurée si précisément.

L'horloge du NPL ne fut pas le premier étalon à jet de césium, mais elle fut la première à fonctionner de manière fiable, ce qui permit de relier la seconde à une transition atomique. Était-ce pour autant une véritable horloge ? Si l'on s'en tient à la définition donnée précédemment, un oscillateur plus un compteur, la réponse est négative. La première publication scientifique décrivant le dispositif, dans la revue *Nature* du 13 août 1955, la présente comme « un

étalon atomique de fréquence et d'intervalle de temps » – un oscillateur ultra-stable sans aucun doute, mais qui n'égrenait pas les secondes ; d'ailleurs, le mot horloge n'apparaît nulle part dans cette publication.

Bien que ce dispositif n'ait jamais fonctionné comme une horloge au sens où on l'entend habituellement – il ne donnait pas l'heure –, il servit régulièrement à étalonner les horloges à quartz déjà très précises du NPL, et permit ainsi d'établir une échelle de temps atomique d'une grande stabilité. Lors des premiers essais, cet étalon avait une stabilité d'une partie par milliard, rapidement améliorée à une partie pour 10 milliards. Quand on les calibrat vis-à-vis de l'étalon au césium, les horloges à quartz devenaient précises à deux parties pour 10 milliards. Tout se passait alors comme si les horloges à quartz étaient le « cadran » de l'horloge atomique.

En très peu de temps, on considéra le dispositif du NPL comme la « première horloge atomique à césium », et Essen lui-même le désignait ainsi. Que l'on choisisse ou non de le nommer « horloge », ce système allait bientôt fournir une contribution décisive à la mesure du temps, comme nous le verrons au prochain chapitre. Essen écrivit plus tard : « Nous invitâmes le Directeur à venir être le témoin de la mort de la seconde astronomique et de la naissance du temps atomique. Et il s'agissait bien d'une naissance car, à notre grand étonnement, il fallut encore une année entière avant qu'une autre horloge atomique ne fonctionne aux États-Unis. »



# 3

## Le temps atomique

« *The times they are a-changin...* » (*Les temps changent...*)  
Bob Dylan, 1964

Dans *Nature*, un article du directeur du NPL, Sir Edward Bullard, accompagnait l'annonce du succès de l'étalon au césium du NPL. Il y faisait observer que la détermination du Temps des Éphémérides nécessiterait quatre années d'observations de la Lune pour un résultat aussi précis que celui qu'on obtenait en quelques minutes avec l'horloge atomique du NPL. « La solution naturelle à cette difficulté, poursuivait-il, serait de définir une « seconde physique » fondée sur cette période naturelle de l'atome de césium, en la choisissant telle qu'elle s'accorde au mieux avec la définition en vigueur de la seconde du Temps des Éphémérides. » Bullard avait choisi ses mots avec soin : il voulait distinguer la « seconde physique » et la « seconde astronomique ». Il formulait clairement ce que de nombreux physiciens, et sans doute d'astronomes, pensaient tout bas : le temps était venu pour les physiciens de remplacer les astronomes dans leur rôle de « gardiens du temps »<sup>6</sup>.

Trois mois après le premier fonctionnement effectif de la première horloge à césium du monde, Louis Essen se trouvait à Dublin

---

6. Le mot anglais *timekeeper* signifie *chronométrateur*, mais au sens original, il peut se comprendre comme *time keeper*, soit « gardien du temps » (N.d.T.).

pour l'assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale. Comme nous l'avons vu au chapitre 1, l'UAI préparait une transition en douceur du Temps Universel TU, avec toutes ses irrégularités, vers le Temps des Éphémérides TE, à l'écoulement plus uniforme. L'un des sujets à l'ordre du jour était une motion qui, si elle était adoptée, confirmerait le passage au temps TE comme base des mesures du temps sur la Terre. Essen était persuadé que ces efforts étaient dépassés par la réalisation d'une horloge atomique et que, à l'avenir, il faudrait fonder la mesure du temps sur les atomes plutôt que sur le mouvement des planètes.

### **Une seconde d'origine physique ?**

À l'époque où la seconde était définie par rapport au jour solaire moyen, les astronomes observaient le transit d'étoiles de référence et déterminaient ainsi le temps TU avec une précision de quelques millisecondes en une nuit, soit une précision relative de quelques parties pour  $10^8$ . En adoptant le temps TE comme échelle officielle, en revanche, on ne pourrait arriver à assigner une heure précise à un événement donné qu'après des observations et des calculs laborieux nécessitant plusieurs années. Que ce soit par sa précision ou par sa disponibilité immédiate, le temps atomique nouveau-né était infiniment supérieur au temps TE. Or, la communauté des astronomes se précipitait vers ce système du TE laborieux et difficile à mettre en place, au prix de longues périodes d'observation ; pire encore, au travers de la Conférence Générale des Poids et Mesures, elle allait y engager la planète entière.

C'est pourquoi, après avoir exposé ses travaux sur l'horloge atomique du NPL, Essen suggéra qu'il serait prudent d'attendre quelque peu avant de se prononcer sur l'adoption du temps TE ; en effet, une définition de l'unité de temps atomique serait nécessaire dans le futur proche, qui supposerait un accord à ce sujet : on pouvait bien attendre jusque là ! Mais il ne fut pas entendu. L'UAI vota la motion sur le Temps des Éphémérides. Le temps TE était là pour

de bon<sup>7</sup>, pour quelque temps en tout cas, et Essen comprit que le premier pas vers son remplacement par le temps atomique était de comparer la nouvelle seconde TE à la fréquence de transition du césium. Toutefois, si l'équipe du NPL avait déjà comparé le temps de son horloge atomique à la seconde solaire moyenne grâce aux signaux temporels de Greenwich, une comparaison avec la seconde TE constituait une tâche bien plus ardue.

### **Du Temps Universel au Temps des Éphémérides**

En même temps qu'elle s'était ralliée au Temps des Éphémérides, la convention de Dublin de l'UAI avait décidé qu'il y aurait désormais trois versions du Temps Universel TU, et cela dans le but de s'adapter aux fluctuations de la rotation terrestre. Le TU que l'on pouvait mesurer directement à partir des transits stellaires, directement déduit du temps sidéral, s'appellerait UT0 (*Universal Time 0*, pour Temps Universel 0). À cause du mouvement de l'axe des pôles terrestre, qui modifie périodiquement la longitude et la latitude des observatoires, UT0 varie quelque peu d'un endroit à l'autre. Le temps UT0, corrigé de ces effets de déplacement de l'axe de rotation, donne le temps UT1 ; celui-ci est identique en tout point de la Terre. En fait, on peut concevoir UT1 comme un angle plutôt qu'un temps, une mesure de l'orientation de la Terre dans l'espace – cette version UT1 du Temps Universel est celle qu'emploient les navigateurs. Enfin, en corrigeant UT1 des variations saisonnières de la vitesse de rotation terrestre, on obtient UT2. Ce temps UT2 est en quelque sorte la version moderne du GMT, l'heure de Greenwich, c'est-à-dire l'approximation d'un temps à l'écoulement régulier, fondé sur la rotation terrestre ; il devait devenir la base de l'heure civile, même si la durée d'une seconde UT2 pouvait encore

---

7. « *ET was here to stay* » : jeu de mots intraduisible. En anglais, le Temps des Éphémérides est abrégé en *ET*. Cette phrase signifie donc aussi : « *ET ne pouvait rentrer chez lui.* » (N.d.T.)

varier à cause, par exemple, du frottement des marées ou bien des variations non-périodiques de la rotation terrestre.

À Dublin, Essen rencontra William Markowitz, de l'USNO, observatoire naval des États-Unis, qui avait suivi avec intérêt les progrès du groupe du NPL. Il dirigeait la division chargée de la diffusion de l'heure dans ce grand centre mondial de mesure du temps à partir des observations astronomiques, et avait déjà réfléchi à une comparaison du nouveau temps UT2 et du Temps des Éphémérides.

Chaque planète, souvenez-vous, est comme l'une des aiguilles d'une hypothétique montre à plusieurs aiguilles, avançant à son propre rythme, mais liée aux autres pour la détermination du temps TE. De même que la grande aiguille d'une montre nous indique une heure plus précise que la petite – qui tourne plus lentement – les planètes qui tournent le plus vite autour du Soleil sont les meilleurs indicateurs du temps TE. Parmi les astres principaux du Système solaire, c'est la Lune qui tourne le plus vite et ainsi, à l'instar d'Edmond Halley et de ses contemporains, les astronomes utilisaient principalement notre satellite pour estimer l'heure qu'il était. Cela supposait de mesurer précisément sa position par rapport aux étoiles d'arrière-plan. De la position des étoiles, on déduisait la position exacte de la Lune sur son orbite et, de là, on établissait le temps TE auquel la Lune était à cet endroit. Si, de plus, on était au service du public, comme l'était évidemment l'équipe de l'USNO, il ne restait qu'à publier une table de corrections entre les temps UT2 et TE, fort utile pour la communauté des astronomes.

Markowitz était tout à fait conscient des difficultés pratiques de l'usage du temps TE et, comme Essen, il était conscient de l'urgence de relier la durée d'une seconde de temps TE à celle du temps atomique. Markowitz avait tout ce qu'il fallait pour mesurer le temps TE, mais pas d'horloge atomique. Essen avait une horloge atomique, mais pas d'observatoire astronomique. Ils décidèrent donc de collaborer.

La convention de l'UAI avait réservé un accueil mitigé à l'horloge atomique d'Essen, lequel n'avait pas réussi à retarder

l'adoption du Temps des Éphémérides. Markowitz réussit tout de même à persuader les astronomes présents que, loin de représenter une menace, l'horloge atomique était exactement ce dont ils avaient besoin pour assurer une diffusion rapide et précise du temps TE. Évidemment, cela supposait de relier la seconde de temps TE aux vibrations de l'atome de césium. Dès que cela serait fait, les horloges atomiques fourniraient le temps TE avec une précision bien plus grande que n'importe quelle horloge à quartz réglée sur UT2. Markowitz et Essen obtinrent une résolution de l'UAI en ce sens, et ils se mirent au travail.

La tâche que cette collaboration NPL-USNO se fixa était double. D'une part, il fallait compter le nombre de cycles d'une horloge au césium dans une seconde de temps UT2, et cela pendant environ trois ans. De l'autre, et dans le même temps, il fallait observer la Lune pour ajuster le temps UT2 sur le temps TE. En combinant les deux, une relation entre temps TE et temps atomique serait établie.

L'USNO avait une longue expérience dans la détermination du Temps Universel (UT) – après tout c'était son travail – et possédait, à Washington et à Richmond, en Floride, des télescopes consacrés à cette tâche, dénommés tubes photographiques zénithaux. Établir une échelle de temps UT2 et la maintenir à l'aide d'horloges à quartz était devenu routinier ; mais comment diable faire traverser l'Atlantique à cette seconde UT2 de l'USNO, pour qu'elle soit disponible au NPL ?

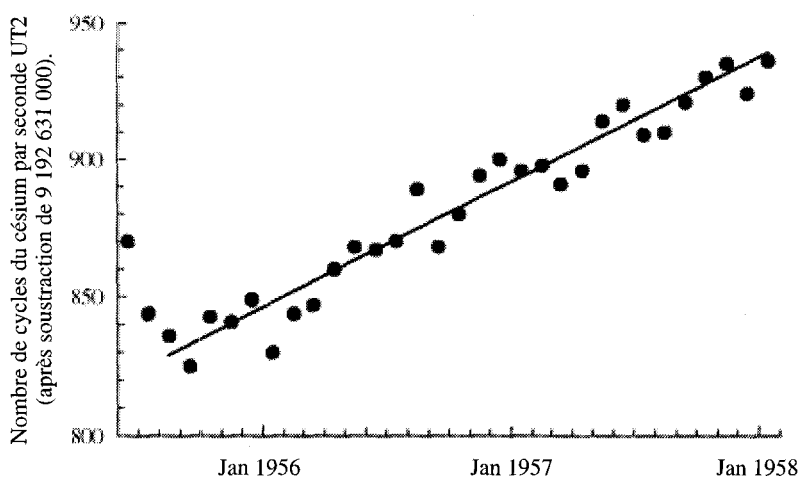
Nous reviendrons en détail au chapitre 6 sur la façon dont on peut distribuer le temps d'un endroit à l'autre ; une des méthodes utilise des émetteurs radio diffusant des signaux horaires. Dans les années 1950, une station à ondes courtes, gérée par le NBS américain et baptisée du doux nom de WWV, émettait ainsi des impulsions toutes les secondes (elle était située près de Washington, à Greenbelt). Une fois par mois, le NPL procédait à une mesure du nombre de cycles du césium dans cette seconde de WWV, à l'aide



de ses horloges à quartz calibrées sur l'étalon au césium ; en même temps, l'USNO comparait le même intervalle de temps à la seconde UT2 en utilisant ses propres horloges à quartz, calibrées sur ses tubes photographiques zénithaux.

En fait, l'exactitude de la seconde fournie par WWV n'avait aucune importance : ce qui comptait, c'est que le même intervalle de temps fût simultanément comparé à UT2 et à la vibration du césium. En confrontant leurs mesures, les deux groupes NPL et USNO pouvaient alors calculer directement la durée d'une seconde UT2 en nombres de cycles du césium.

Comme on pouvait s'y attendre, la seconde UT2 n'était pas constante quand on la comparait à l'étalon au césium (*voir la figure 23*). Même en lissant les variations saisonnières – en calculant la valeur



23. Les mesures réalisées au NPL et à l'USNO à la fin des années 1950 (les points noirs) semblaient montrer que la fréquence de transition du césium croissait régulièrement par rapport au temps UT2 – les points sont proches d'une ligne droite. En réalité, c'est au contraire la rotation terrestre qui ralentissait et donc la seconde UT2 qui s'allongeait. Il y avait plus de cycles du césium dans une « seconde » UT2, d'où l'illusion d'une fréquence allant croissant. Il faut comparer ce diagramme à celui de la figure 40.

moyenne sur une année – la longueur de la seconde augmenta régulièrement entre les premières mesures de l'été 1955 et la fin de la collaboration, trois ans plus tard. Fait incroyable : cet accroissement de la durée du jour était 50 fois supérieur à ce qu'on aurait pu calculer à partir du simple frottement des marées ; il fallait comprendre ce phénomène, et seuls ceux qui avaient accès au temps atomique pourraient explorer ces nouveaux sujets de recherche.

### **La caméra lunaire**

Pendant qu'au NPL on reliait la seconde du temps UT2 à celle du temps atomique, l'équipe de Markowitz se chargeait de la comparer au Temps des Éphémérides, à l'aide d'observations de la Lune. Pour cela, la méthode usuelle consiste à mesurer la position exacte de la Lune en observant l'instant précis de l'« occultation » d'une étoile derrière la Lune. Les étoiles sont si éloignées de nous qu'elles semblent être des points lumineux : leur disparition paraît donc instantanée. Si l'on est capable de mesurer l'instant exact de l'occultation, la position du bord de la Lune à cet instant est ainsi mesurée avec une grande précision. Toutefois, les occultations d'étoiles brillantes sont rares, et une seule mesure n'est pas suffisante pour en déduire la position du *centre* de la Lune. En fait, il faudrait plutôt photographier la Lune et déterminer sa position par rapport à plusieurs étoiles du voisinage.

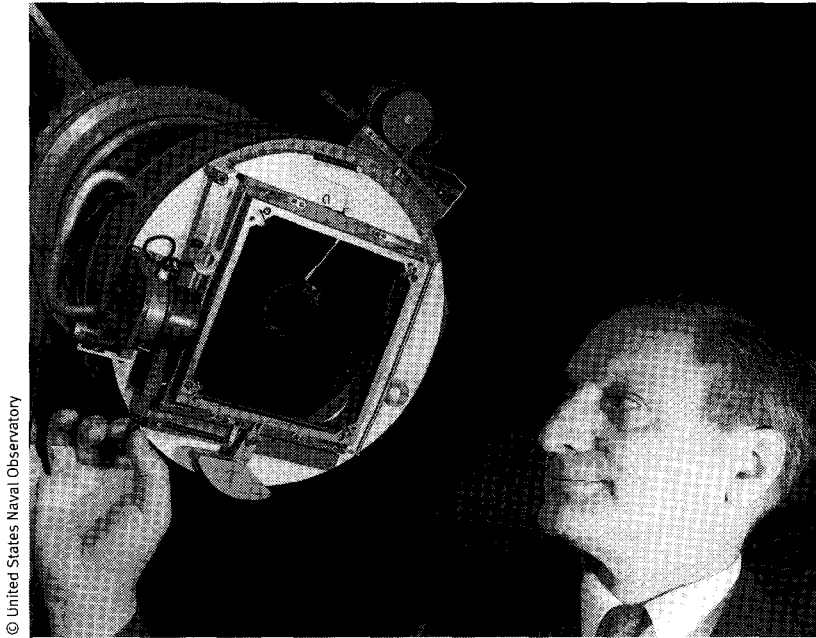
Prendre des photographies de la Lune qui permettent de faire ces mesures est loin d'être évident ! Tout d'abord, la Lune est bien plus brillante que les étoiles d'arrière-plan. Pour photographier la Lune, il faut un temps de pose très bref, mais alors on ne voit pas les étoiles. Pour les voir, on doit allonger l'exposition, et la Lune sature la pellicule, ce qui rend toute mesure précise impossible.

Le second problème est encore plus sérieux : il est lié à la raison même du choix de la Lune pour ces mesures, à savoir son mouvement apparent très rapide dans le ciel. Les télescopes sont conçus pour compenser la rotation terrestre : ils sont entraînés dans le sens de

rotation opposé afin de garder les étoiles observées dans leur champ. La Terre fait un tour vers l'est, soit 360 degrés, en 24 heures ; le télescope doit donc compenser ce mouvement en tournant vers l'ouest au rythme d'un degré toutes les 4 minutes. C'est ainsi que l'on peut prendre des photographies d'étoiles faibles avec un long temps de pose, parfois jusqu'à plusieurs heures. Comme tous les autres corps célestes, la Lune est entraînée vers l'ouest, mais elle tourne aussi autour de la Terre : cette rotation orbitale la fait défiler par rapport aux étoiles, vers l'est, d'environ 13 degrés par jour, soit une demi-seconde d'arc pour chaque seconde de temps. Les astronomes photographient la Lune en ajustant la vitesse de suivi du télescope pour qu'il suive la Lune et non pas les étoiles, mais ils ne peuvent pas suivre les deux à la fois. Si le télescope suit les étoiles, le bord de la Lune se retrouve flou (« filé ») ; s'il suit la Lune, les étoiles sont transformées en petits arcs de cercle. C'est donc pour la même raison – son mouvement rapide – que la Lune est à la fois un bon moyen de mesurer le Temps des Éphémérides et difficile à photographier.

Les premières mesures photographiques de la position lunaire remontent à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Depuis cette époque, les concepteurs de caméras lunaires ont utilisé de nombreux moyens pour résoudre ces deux problèmes de la luminosité et du mouvement de la Lune. Habituellement, ils s'arrangent pour réduire la lumière en provenance de la Lune, sans affecter celle des étoiles : pour cela, on dispose, en face du télescope, un disque qui arrête la lumière lunaire après une exposition très brève, ou bien on emploie un obturateur spécifique près de la plaque photographique elle-même. Ces deux techniques ne permettent malheureusement pas d'obtenir des mesures précises, car la Lune et les étoiles ne sont pas photographiées au même moment. On s'expose donc à une erreur, même légère, dans la vitesse de rotation du télescope, qui déplacerait la Lune par rapport aux étoiles.

La solution proposée par Markowitz a reçu le nom de caméra lunaire à double entraînement (*voir la figure 24*). Il la conçut en



© United States Naval Observatory

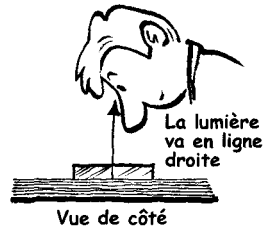
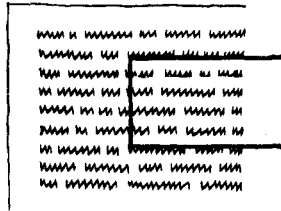
24. William Markowitz, de l'observatoire naval des États-Unis, face à la caméra lunaire qu'il a conçue pour la mesure du Temps des Éphémérides. Sur cette photographie, on a retiré le capot arrière de la caméra pour montrer le filtre circulaire qui s'incline lentement afin d'empêcher la Lune de dériver par rapport aux étoiles.

1951 dans l'unique but de déterminer le temps TE, et elle fut employée pour la première fois à l'USNO, en juin de l'année suivante.

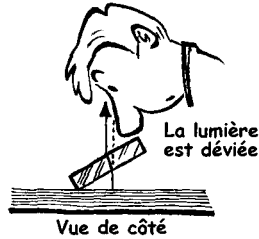
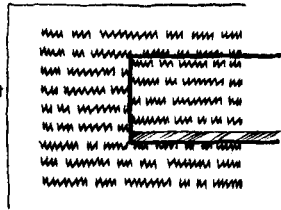
Pour comprendre comment fonctionne la caméra de Markowitz, prenez une règle plate transparente et posez-la sur cette page, parallèlement aux lignes imprimées, de sorte que l'extrémité de la règle soit au milieu de la page (*voir la figure 25*). Quand on regarde à la verticale, les lignes de caractères ne sont pas sensiblement modifiées par la présence de la règle. Si vous inclinez la règle en soulevant son bord inférieur, les lignes situées derrière la règle semblent monter vers le haut de la page. Si vous soulevez le bord supérieur,

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

Quand la règle est à plat sur la page, les lignes de caractères ne sont pas déformées.



Quand la règle est inclinée, les lignes se déplacent vers le haut de la page



25. Une simple règle en plastique permet de comprendre le principe de la caméra de Markowitz (voir le texte).

elles semblent au contraire aller vers le bas. L'effet n'est pas énorme : il n'est visible que quand on incline la règle d'un angle important. Il est dû à la déviation (la « réfraction ») des rayons lumineux par la surface inclinée de la règle : les rayons suivent alors un chemin en ligne brisée et apparaissent donc légèrement décalés.

À quoi peut bien servir ce phénomène pour photographier la Lune ? La caméra de Markowitz contenait une plaque photographique de 16 centimètres de côté. Face à celle-ci, se trouvait un filtre circulaire, en verre très absorbant, d'une épaisseur de 1,8 millimètre et juste assez grand pour couvrir l'image de la Lune sur la plaque. Pendant qu'on exposait la photographie, la Lune se déplaçait par rapport aux étoiles mais, en même temps, le filtre s'inclinait. De plus, de la même façon que notre règle en plastique déplace les lignes de caractères, le filtre déplaçait l'image de la Lune. La vitesse et l'axe de rotation du filtre étaient soigneusement calculés pour compenser le mouvement de la Lune dans le ciel, avec pour résultat une image de

## LE TEMPS ATOMIQUE

la Lune quasi-immobile, du moins tant que les poses ne dépassaient pas 20 secondes. L'instant de référence pour la comparaison entre la position de la Lune et celles des étoiles était celui où le filtre circulaire était parallèle à la plaque photographique. Comme le filtre était très absorbant – il ne laissait passer que 0,2 pour cent de la lumière lunaire – la Lune n'était pas non plus surexposée sur ces clichés.

La fabrication de la caméra ne souffrait, selon Markowitz lui-même, aucune imprécision. Pour un travail de qualité, il fallait suivre la position de la Lune avec une précision supérieure à 0,1 seconde d'arc. À l'époque, l'entraînement du télescope qu'il prévoyait d'utiliser n'atteignait pas une telle stabilité. Il décida donc d'entraîner non pas le télescope, mais la caméra elle-même. Lors des mesures, il fallait viser la Lune avec le télescope, couper l'entraînement, puis laisser le mécanisme interne déplacer lentement le porte-plaques à l'intérieur de la caméra pour suivre les étoiles. Une pose de 10 secondes suffisait à photographier plusieurs étoiles dont on pouvait ensuite mesurer les positions.

Markowitz avait également conçu une machine à mesurer les plaques photographiques. Ces dernières étaient montées sur un chariot mobile suivant deux directions à l'aide de vis étalonnées ; on pouvait également les faire tourner. Équipé d'un microscope à réticule, un technicien mesurait la position des étoiles ainsi que d'une trentaine de points sur le bord de la Lune ; ces derniers permettaient alors de calculer la position du centre de la Lune sur le cliché. En comparant ces mesures aux coordonnées astronomiques des étoiles issues de catalogues préétablis, on en déduisait enfin la position de la Lune dans le ciel à l'instant où le cliché avait été pris. Une dernière correction était nécessaire : pour se conformer à la pratique usuelle, on devait rapporter la position de la Lune à celle mesurée par un hypothétique observateur situé au centre de la Terre<sup>8</sup>.

---

8. Cette dernière opération permet de comparer les mesures faites depuis plusieurs observatoires terrestres différents. (N.d.T.)

En répétant cette opération de nombreuses fois, Markowitz et ses collègues obtenaient une série de positions précises de la Lune, chacune à un instant précis par rapport au temps UT2. La dernière étape consistait à attribuer un Temps des Éphémérides TE à chacune des photographies. Pour cela, il fallait consulter des Éphémérides lunaires de grande précision, calculées par le bureau de l'almanach nautique des États-Unis. Ces tables contenaient les positions prédites de la Lune à intervalles réguliers de temps TE. En pratique, le temps TE était alors défini principalement à partir du mouvement de la Lune : ces tables représentaient le sésame du Temps des Éphémérides. Ainsi, les astronomes pouvaient attribuer une valeur du temps TE à chaque cliché lunaire et en déduire la différence entre UT2 et TE. Grâce à l'équipe d'Essen, ils connaissaient le nombre de cycles du césium dans une seconde de temps UT2 – nombre qui augmentait régulièrement comme nous l'avons vu sur la figure 22. La boucle était enfin bouclée : il ne restait que l'étape ultime, la plus simple, qui consistait à déduire le nombre de cycles du césium dans une seconde de temps TE.

C'est en 1958, après trois ans de mesures, que la collaboration USNO-NPL annonça le résultat de ses efforts. Contrairement à la seconde UT2, la seconde TE semblait bel et bien constante, et on y comptait 9 192 631 770 cycles de la fréquence hyperfine du césium, avec une incertitude de mesure de plus ou moins 20 cycles. Cette mesure avait donc une précision de deux parties pour 100 millions, limitée non pas aux cycles de l'horloge atomique mais bien par la difficulté intrinsèque à la mesure du Temps des Éphémérides.

### **Le temps atomique**

Markowitz avait engagé une collaboration avec Essen car, en 1955, il n'existait aucune horloge atomique opérationnelle aux États-Unis. Pendant plus d'une année, Louis Essen et Jack Parry avaient eu le plaisir de faire fonctionner la seule et unique horloge

atomique de la planète, mais les événements se précipitaient. Pendant que l'équipe du NBS s'échinait à remettre en marche son étalon au césium, rétif après son déménagement, Jerrold Zacharias, du MIT, s'apprêtait à confier la chaîne de production de son horloge atomique transportable, baptisée « Atomichron » à une entreprise privée. D'autres étalons de fréquence étaient en construction au Canada et en Suisse, ainsi qu'aux États-Unis, et le club des fabricants d'horloges atomiques était sur le point de s'élargir.

Certains de ces étalons de fréquence étaient utilisés pour établir des échelles de temps atomique. En effet, de la même façon que les échelles de temps astronomiques sont réalisées en comptant les jours, les échelles de temps atomiques sont obtenues en comptant des périodes de la transition du césium. Quand le compteur atteint le nombre de 9 192 631 770, c'est qu'une seconde exactement s'est écoulée. Les secondes sont à leur tour dénombrées, et l'on en déduit les minutes, les heures et les jours.

La première échelle de temps atomique date du mois de juin 1955 ; elle fut réalisée par l'observatoire royal de Greenwich à partir des données fournies par l'étalon au césium du NPL. Peu après, le Bureau International de l'Heure, le BIH, dont le but était de fournir, sous les auspices de l'UAI un système mondial de temps astronomique, introduisit son échelle, dénommée AM. Initialement tirée des mêmes données du NPL, cette seconde échelle fit bientôt appel à une moyenne de divers étalons au césium situés aux États-Unis, en Suisse et en France ; elle consistait en des tables de correction à appliquer aux signaux horaires diffusés par radio. La coordination entre ces horloges atomiques fort éloignées les unes des autres était assurée par l'intermédiaire de radiobalises utilisant des transmissions radio basse fréquence, à la manière dont WWV avait été utilisé pour transférer le temps UT2 à travers l'Atlantique. La première échelle de temps atomique aux États-Unis fut mise en service en 1959 par l'USNO. Tout comme l'échelle du BIH, on la synchronisa avec le temps UT2, à 00 h 00 UT2, le 1<sup>er</sup> janvier 1958.



De toutes les unités de mesure physique, la seconde a la particularité de pouvoir être transmise à distance, quasi-instantanément et avec une grande précision, à l'aide de transmissions radio. Mais que l'on ne s'y trompe pas : l'échelle de temps du BIH n'était pas *émise* par celui-ci ; le BIH se contentait de publier des tables de corrections que l'on devait appliquer *a posteriori* à des signaux horaires pour obtenir le temps atomique. En conséquence, le temps atomique n'était pas disponible immédiatement ; on ne bénéficiait de sa précision qu'avec « le recul du temps ».

Le temps atomique avait donc hérité de l'absence de disponibilité immédiate du Temps des Éphémérides. La définition du temps TE avait été choisie pour le rendre proche du temps UT au début de l'année 1900, et la seconde du TE avait été déterminée à partir de mesures de la durée du jour solaire moyen aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles. Cependant, on était dans les années 1950, et le jour s'était allongé ; UT2 était déjà en retard de 30 secondes sur TE, et la seconde TE était loin de valoir 1/86 400<sup>e</sup> du jour solaire moyen. La seconde TE – qui allait bientôt devenir la seconde du système international d'unités SI – était tout bonnement trop courte pour s'adapter à la rotation terrestre de l'année 1958. Non seulement le temps atomique s'écartait de l'échelle de temps fournie par la Terre, mais on pouvait même dire qu'il fonçait de l'avant.

Cela préoccupait les « gardiens du temps » à travers le monde. D'une part, les horloges atomiques coordonnées par le BIH égrenaient à présent une file ininterrompue de secondes TE d'une précision fabuleuse, chacune identique à sa voisine. De l'autre, la seconde officielle, fruit d'un accord négocié à l'échelon international, était... trop courte. Le résultat était qu'une année de 365 jours contenait 31 536 000 secondes solaires moyennes, mais également 31 536 001 secondes TE. Pour toutes sortes de raisons, dont le souci d'éviter d'égarer les navigateurs n'était pas la moindre, on jugeait que le Temps Universel UT radiodiffusé devait continuer à être lié peu ou prou à la rotation terrestre ; il fallait donc le maintenir

proche de UT2, et l'année devait continuer à comporter 31 536 000 secondes.

C'est pourquoi, à compter du 1<sup>er</sup> janvier 1960, plusieurs observatoires et laboratoires se mirent d'accord pour fournir une nouvelle version du temps UT que l'on nommerait le Temps Universel Coordonné, ou UTC (pour *Universal Time Coordinated*). Ils s'entendirent sur une méthode, dont la gestion serait confiée au BIH, pour maintenir le temps UTC en coïncidence approximative avec le temps UT2. Cela se passerait en deux étapes. D'abord, la longueur de la seconde UTC serait ajustée chaque année pour que le jour solaire moyen continue à comporter 86 400 secondes. Ainsi, les signaux horaires radiodiffusés seraient non pas des secondes TE, mais un intervalle de temps proche de la seconde solaire moyenne, du moins si on l'avait prédite avec succès. Le BIH suivrait l'évolution de la rotation terrestre, grâce à des observatoires astronomiques tels que l'USNO. Si les prédictions venaient à s'éloigner de la réalité mesurée de la rotation terrestre, le BIH était autorisé à introduire dans le temps UTC des corrections d'une fraction de seconde afin de l'accorder avec le jour solaire moyen. Autrement dit, de temps à autre, le temps UTC aurait une « seconde » plus courte ou plus longue que les autres.

Au début de janvier 1961, par exemple, la seconde UTC fut rallongée de 15 parties par milliard par rapport à la seconde TE. La première seconde du mois d'août 1961 fut, quant à elle, d'une durée de 0,95 seconde, afin d'empêcher UTC de trop retarder sur la rotation terrestre. En janvier 1962, il fallut « diminuer l'allongement » à 13 parties par milliard ; en avril 1964, on intercala une pause de 0,1 seconde supplémentaire. En septembre 1965, un premier bilan faisait apparaître que le temps UTC avait subi 5 pauses de plus ; en janvier 1966, l'allongement de la seconde atteignait 30 parties par milliard. UTC continua à ce train jusqu'en février 1968, où il fallut le « retenir » de 0,1 seconde.

La situation commençait à devenir complexe : la méthode adoptée ne semblait pas idéale pour le fonctionnement d'une échelle

de temps internationale. Chaque fois que le taux d'écoulement du temps UTC était ajusté, ou arrêté brièvement, toutes les horloges du monde étaient censées faire de même. Pour le cas des signaux radio, cela impliquait parfois l'installation onéreuse de nouveaux équipements. À cause de tous ces hoquets de l'UTC, le simple calcul de l'intervalle de temps entre deux dates devenait un cauchemar : une bête soustraction ne suffisait plus. Nombreux étaient ceux qui critiquaient le principe même de l'ajustement d'une unité définie – la seconde TE ou SI – afin de la faire correspondre à un intervalle de temps – la seconde UT2 – dont tous savaient maintenant qu'il présentait une variabilité naturelle.

Dans la pratique, de nombreux bureaux nationaux de l'heure continuaient à faire leur propre « cuisine », sans se soucier des annonces officielles du BIH. À titre d'exemple, la station de radio américaine WWVB – sœur cadette de WWV – émettait ce qu'elle dénommait le « Temps Atomique Échelonné », dont les intervalles de temps étaient des secondes TE précises, mais où s'intercalaient de temps à autre des « échelons » de correction destinés à ne jamais s'éloigner de plus de 0,1 seconde du temps UT2. Par-dessus cela se greffaient des conflits de pouvoir : qui était responsable du maintien d'une échelle horaire, les observatoires nationaux – qui voyaient la maîtrise du temps leur échapper – ou bien les laboratoires de métrologie, détenteurs des horloges atomiques ? Au Royaume-Uni par exemple, on trouva le *modus vivendi* suivant : le NPL contrôlait la bande de transmission des émissions radio tandis que l'Observatoire de Greenwich était responsable des signaux horaires eux-mêmes.

### **Vers la seconde atomique**

Résumons cette situation confuse. La seconde de temps TE était devenue l'unité officielle de temps du nouveau Système International en 1960. À cette date, de nombreux laboratoires de métrologie à la surface du Globe produisaient des échelles de temps atomique d'une exactitude et d'une précision bien supérieure à

celles que des observations astronomiques pourraient jamais fournir. La collaboration NPL-USNO avait relié la seconde TE à la transition du césium ; une horloge atomique pouvait donc déterminer une seconde SI en quelques minutes et avec une précision comparable, voire supérieure, à celle obtenue au bout d'une année d'observations de la Lune. Que cela ravisse ou non les astronomes, les horloges atomiques, et non pas les échelles de temps astronomiques laborieusement mises sur pied, étaient désormais les sources *de facto* des secondes TE.

En décembre 1963, un comité d'experts de la CGPM – comprenant William Markowitz et Louis Essen – se réunit à Paris pour envisager une redéfinition éventuelle de la seconde SI à partir d'un étalon de temps atomique. C'était leur troisième réunion. Lors des deux précédentes, le comité n'avait pas fait preuve d'un zèle excessif en faveur de l'abandon de la seconde TE ; il préférait attendre les développements nouveaux dans le domaine du temps atomique. Après tout, de nouveaux types d'horloges étaient apparus, dont le fameux maser à hydrogène, œuvre de Norman Ramsey, dont les cavités à micro-onde avaient permis la réalisation pratique des horloges au césium. Comment deviner laquelle s'avérerait la plus fiable et la plus précise ? Huit années s'étaient déjà écoulées depuis la première horloge au césium, et le comité convint qu'il était temps de *faire quelque chose*. L'année suivante, la CGPM adopta donc sa recommandation pour une définition provisoire – et pas très élégante – de la seconde SI, fondée sur le temps atomique. « Le nouvel étalon sera la transition entre les deux niveaux hyperfins  $F = 4$ ,  $m_F = 0$  et  $F = 3$ ,  $m_F = 0$  de l'état fondamental  $2_{S1/2}$  de l'atome de césium 133 en l'absence de perturbations extérieures, à laquelle on assignera la valeur de 9 192 631 770 hertz. »

Lorsque la treizième assemblée générale de la CGPM se réunit, en octobre 1967, les doutes étaient dissipés. Les horloges atomiques avaient prouvé leur valeur, à la satisfaction de chacun. Une majorité écrasante adopta donc la résolution suivante, dont la version

originale est en français : « La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. » La seconde s'était détachée de la longueur du jour, ainsi que du mouvement des planètes ; on n'observerait plus les cieux pour y lire l'heure.

C'est ainsi que se termina l'ère du temps astronomique.

### **Épilogue**

Ayant accompli sa tâche, l'étalon au césium du NPL fut offert en 1962 au Musée des Sciences de Londres. Il y trône aujourd'hui au premier étage, et tranche quelque peu avec ses voisines, des horloges plus conventionnelles dans leur beau cadre de bois poli. De plus, à cause de l'absence de parties mobiles apparentes, il attire moins l'attention des visiteurs. Le tube qui, à l'origine, contenait le jet de césium a été coupé pour que le visiteur puisse l'observer, à la manière des spécimens du Muséum d'Histoire Naturelle voisin. On peut voir le petit four d'où jaillissaient les atomes de césium, et le détecteur très simple qui les « attrapait » à l'autre extrémité. On inspecte aussi les aimants de déflexion qui triaient les atomes, la cavité de Ramsey en forme de U qui induisait la transition hyperfine, et les bobines de protection, qui permettaient de s'affranchir de l'influence des perturbations magnétiques extérieures. Aujourd'hui, l'horloge est marron, les parties métalliques sont ternies et le vernis s'est décoloré. Pourtant, cet appareil à l'apparence banale et sans aucun cadran précipita l'avènement de l'ère du temps atomique.

# 4

## Un temps planétaire

*« Celui qui a une montre connaît l'heure ;  
celui qui en a deux ne la connaît jamais. »*

Anonyme

### **Le mythe d'une horloge mondiale**

Si l'on vous demandait de concevoir un système horaire mondial, comment vous y prendriez-vous ? Peut-être penseriez-vous d'abord à construire la meilleure horloge atomique du monde – ne regardez pas à la dépense ! – et vous l'installeriez au BIPM, le gardien des tous les étalons de mesure internationaux. Là, elle égrènerait imperturbablement ses secondes SI, les diffusant au monde entier. Quiconque voudrait régler son horloge sur l'heure mondiale n'aurait qu'à guetter les signaux horaires en provenance de Paris.

Si une telle notion de temps « planétaire » semble attirante, elle n'est pas sans inconvénient. Figurez-vous qu'il arrive aux horloges de s'arrêter ! Quand le temps repose sur la rotation terrestre, cela ne pose aucun problème, car la Terre continue à tourner pendant qu'on essaie de redémarrer l'horloge. À raison d'un tour par jour, il faudrait être particulièrement négligent pour oublier de compter l'un des tic-tacs de l'« horloge Terre ». Avec les horloges atomiques, c'est une autre affaire. Quand on sait que celles-ci battent plus

de 9 milliards de coups par seconde, arrêter l'« horloge mondiale » serait une catastrophe dont on aurait du mal à se relever.

D'ailleurs, il ne fait aucun doute qu'elle s'arrêterait un jour ! Même sans parler des pannes et des révisions périodiques, les horloges à jet de césium finissent toutes, un jour ou l'autre, par manquer de césium. Comme on évapore le césium à un bout de l'appareillage avant de le transporter à l'autre bout, après quelques années de fonctionnement, il faut bien refaire le plein. Même de tels arrêts programmés pourraient mettre à mal un temps mondial fondé sur cette unique horloge.

De plus, la technologie des horloges atomiques évolue sans cesse. Les meilleurs étalons de fréquence sont en général des appareillages « dernier cri ». Leurs concepteurs les améliorent sans cesse, en essayant de nouvelles idées ou techniques. Voilà un autre inconvénient d'une « horloge mondiale » : si nous décidions aujourd'hui d'en construire une, elle serait bonne à mettre au rancart d'ici un an. Bref, comment conserver la meilleure horloge du monde sans l'arrêter de temps à autre pour tenter de l'améliorer ?

En outre, nous n'avons pas encore évoqué l'objection principale à l'existence d'une horloge mondiale. Comment savoir qu'elle donne bien la meilleure heure, et même l'heure exacte ? Imaginez que cette horloge acquiert un léger défaut et qu'elle ne donne pas ou plus l'heure exacte. Comment le saurions-nous *sans la comparer avec une autre horloge* ?

On pourrait construire deux horloges identiques. En constatant qu'elles donnent toutes deux la même heure, ne serions-nous pas rassurés sur l'exactitude de cette heure ? Cette idée est certainement séduisante, mais il est une chose que l'expérience nous apprend : deux horloges ne donnent *jamais* la même heure. On aura beau construire deux horloges, identiques en tout point dans la mesure de nos capacités, même synchronisées aussi précisément que possible, rien ne les empêchera de diverger au bout d'un certain temps. Il existera toujours un minuscule écart dans leurs pulsations

qui, si on lui laisse suffisamment de temps, résultera en une différence d'heure affichée toujours plus importante.

Attention, car la situation s'aggrave. Si nous avons deux horloges qui donnent deux heures différentes, laquelle allons-nous choisir comme référence ? Il n'y a aucun moyen de décider laquelle de ces deux horloges identiques a « raison ». Pourquoi pas trois horloges, alors ? Il y en aura toujours deux plus ou moins en accord, et ce sera la troisième qu'il faudra incriminer. Bon, mais par prudence, il vaudrait mieux en avoir quatre, au cas où l'une s'arrêterait pour de bon. Et puis non, plutôt cinq, car cela permettrait d'en arrêter une pour les maintenances périodiques...

Je pense que vous avez compris qu'il ne peut y avoir une seule horloge mondiale de référence. Il n'existe donc pas d'horloge à Paris qui égrène les secondes SI officielles ; en revanche, on y trouve le BIPM, qui fournit deux échelles de temps, le Temps Atomique International, ou TAI, et le Temps Universel Coordonné, ou UTC (dont nous avons parlé plus haut).

### **Les échelles de temps mondiales**

Les années 1960 furent une époque de confusion, où les autorités essayaient de concilier l'échelle de temps uniforme et précise des horloges atomiques avec la trop imparfaite rotation terrestre, ainsi qu'avec le Temps des Éphémérides, plus régulier mais difficile d'accès. Cependant, à partir de 1967, date à laquelle la seconde fut enfin affranchie de son héritage astronomique pour être uniquement reliée à la transition du césium, la voie était libre pour résorber la pagaille internationale sur les échelles de temps. En 1971, la CGPM baptisa TAI (Temps Atomique International) l'échelle de temps atomique du BIH. Simultanément, le Comité Consultatif International sur les ondes radio – émanation de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) – recommanda l'adoption d'une nouvelle version du Temps Universel Coordonné (UTC), lié au TAI, qui serait utilisé pour les signaux horaires en



radio. Conséquence directe de ces deux résolutions, un nouveau système planétaire de mesure et conservation du temps, basé à la fois sur le TAI et l'UTC, vit le jour le 1<sup>er</sup> janvier 1972.

À l'exception d'une modification administrative notable, nous utilisons aujourd'hui exactement le système de 1972. Le BIH, gardien international du temps depuis 1920, a en effet été dissous par l'Union Astronomique Internationale le 1<sup>er</sup> janvier 1988. Ses activités de « gardien du temps » furent transférées à une nouvelle section du BIPM de Sèvres (la section du temps), alors que ses responsabilités concernant l'astronomie furent confiées à un nouveau service, le Service International de la Rotation Terrestre (ou IERS, pour *International Earth Rotation Service*), établi non loin de Sèvres, à l'Observatoire de Paris. Nous reviendrons sur le travail de l'IERS au chapitre suivant.

Le TAI est la continuation directe de l'échelle de temps atomique du BIH, dont l'origine remonte à 1955 et à l'étalon au césium du NPL. Il s'agit d'une échelle uniforme dont l'intervalle élémentaire est la seconde SI, telle que définie en 1967 en fonction de la fréquence de la transition hyperfine du césium. Le TAI est établi à partir, non pas d'une horloge unique sise à Paris, mais d'une combinaison de plus de 260 horloges atomiques dispersées à la surface de la Terre, elles-mêmes étalonnées à l'aide d'une douzaine d'étalons primaires de fréquence.

Le temps UTC est la base du temps civil, et il joue le même rôle qu'a pu remplir l'heure GMT dans les années 1920. Quand vous entendez des signaux horaires radiodiffusés, c'est de l'UTC, à quelques heures près éventuellement, en fonction du fuseau horaire où vous vous trouvez. Le temps UTC est lui aussi fondé sur des secondes SI exactes, et il n'est plus autorisé à différer du TAI que par un nombre *entier* de ces secondes. Cette contrainte étant donnée, on s'arrange pour qu'il suive la rotation de la Terre au plus près. Chaque fois que des variations de la durée du jour menacent d'écartier UTC de plus de 0,9 seconde du temps UT1 – lequel est,

souvenez-vous, le temps UT défini par l'orientation dans l'espace de la Terre – une « seconde intercalaire »<sup>9</sup> peut être introduite (ou supprimée) afin de réduire l'écart. Le TAI et l'UTC ont été définis comme exactement synchrones en 1958 ; au début de l'année 2003, UTC retarde exactement de 32 secondes sur le TAI.

Nous détaillerons plus loin la « fabrication » du TAI et de l'UTC, mais nous allons d'abord faire un détour par les successeurs de l'horloge atomique du NPL, les étalons primaires de fréquence qui établissent en pratique la durée de la seconde SI.

### **Les étalons primaires**

Les étalons primaires de fréquence sont le cœur du système mondial de mesure du temps, et ils sont tous fondés sur la transition du césium. Leur fonction est de fournir des secondes SI exactes, sans aucune référence à des contingences externes. Ils sont peu nombreux et cela les rend d'autant plus précieux. Le rapport annuel du BIPM nous apprend que, sur la période 1993-1998, seuls 11 étalons primaires situés dans 7 laboratoires différents ont contribué à l'établissement du TAI. Et encore n'étaient-ils pas tous en fonctionnement continu (*voir la figure 26*) : il est même arrivé que seuls deux ou trois d'entre eux soient opérationnels à un moment donné. Ces appareillages ne sont pas conçus pour « donner l'heure » (encore que quelques-uns d'entre eux le fassent) ; leur but est de mesurer la durée de la seconde. Chacun est unique en son genre, sorte de prototype construit sur mesure pour atteindre la précision maximale que la physique moderne autorise. D'une certaine manière, chacun constitue un étalon expérimental, et c'est pourquoi ils sont si souvent arrêtés. Leurs concepteurs les bichonnent, les améliorent continuellement, afin d'en extraire demain un peu plus de précision qu'aujourd'hui.

---

9. Les Anglo-saxons parlent de *leap second*, ou *seconde « avec saut »*, par analogie avec l'année bissextile, ou *leap year*, qui comporte aussi un saut, d'un jour. Pour plus de détails, voir le chapitre 5 (N.d.T.).

Institut	Lieu	Nom	Incertitude (parties pour 10 <sup>14</sup> )	Type
<i>Communications Research Laboratory</i>	Tokyo, Japon	CRL-01	1.0	Jet de césium avec pompage optique
<i>Institute of Metrology for Time and Space</i>	Mendeleevo, Russie	SU MCsR 102	5	Jet de césium
Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences	Paris, France	LPTF-JPO	11	Jet de césium avec pompage optique
		LPTF-FO1	0.22	Fontaine à césium
<i>National Institute of Standards and Technology</i>	Boulder, États-Unis	NIST-7	0.7-1.0	Jet de césium avec pompage optique
<i>National Research Council of Canada</i>	Ottawa, Canada	CsVIA	10	Jet de césium
		CsVIC	10	Jet de césium
<i>National Research Laboratory of Metrology</i>	Tsukuba, Japon	NRLM-4	2.9	Jet de césium avec pompage optique
<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i>	Braunschweig, Allemagne	CS1	0.7-3.0	Jet de césium
		CS2	1.5	Jet de césium
		CS3	1.4	Jet de césium

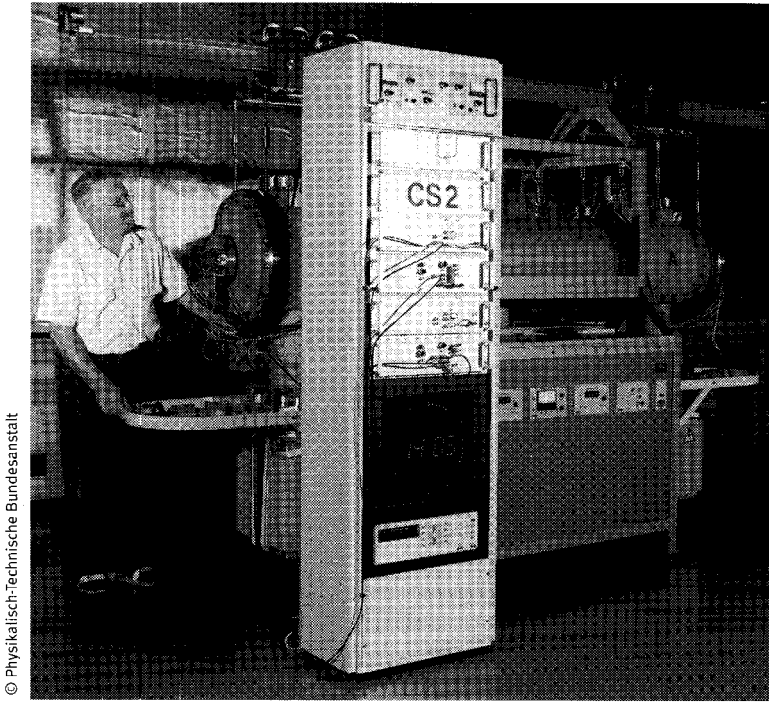
26. Les étalons primaires de fréquence ayant contribué au TAI entre 1993 et 1998.

Leur précision dans la mesure de la seconde varie entre une partie pour  $10^{13}$  et deux parties pour  $10^{15}$ , soit un écart d'un facteur 50. Par comparaison, on exigeait du chronomètre de Thomas Harrison, celui qui révolutionna la navigation au XVIII<sup>e</sup> siècle, qu'il fût précis au niveau de 3 secondes par jour ; le meilleur des étalons actuels fait mieux qu'une nanoseconde (un milliardième de seconde) par jour. La durée d'une seconde est une grandeur connue avec 14 décimales – de loin l'unité de mesure physique la plus précisément déterminée.

### **Des jets classiques**

Il est largement admis que les meilleurs étalons classiques à jet de césium, semblables dans leur principe à celui du NPL dans les années 1950, sont les appareils fabriqués et mis en œuvre au *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), à Brunswick en Allemagne. Le PTB est le laboratoire national allemand de métrologie, et c'est là que, dans les années 1930, des scientifiques découvrirent pour la première fois les variations saisonnières de la rotation terrestre à l'aide d'horloges à quartz.

Le premier étalon primaire du PTB, dénommé CS1, a été mis en service en 1969. Jusqu'en 1978, il a fonctionné de façon intermittente ; entre 1978 et 1995, en revanche, il n'a subi aucune interruption. Il a ensuite été remis à niveau, et fonctionne en continu depuis 1997. Son successeur, CS2, fonctionne en continu depuis 1986 (*voir la figure 27*). CS2 a été l'étalon primaire le plus précis du monde pendant neuf ans, jusqu'en 1995. CS1 et CS2 innovaient par leurs aimants de déflexion, qui permettaient de bien focaliser, dans le faisceau, les atomes de césium ayant subi la transition ; cela a permis de réduire les erreurs associées à des déflexions trop importantes. Les vitesses d'atomes dans les faisceaux sont aujourd'hui inférieures à 100 mètres par seconde, soit moins de la moitié de ce qu'elles étaient dans le premier étalon du NPL. Autre astuce, ces deux appareils sont conçus pour fonctionner dans les deux sens – il



27. Le technicien en chef Harald Brand face à CS2, l'un des quatre étalons à jet de césium en service au PTB, le laboratoire allemand des étalons de mesure. CS2 fonctionne en continu en tant qu'horloge et il fournit l'UTC pour l'Allemagne. C'est Brand qui a été responsable de la construction de CS2 ; il a récemment pris sa retraite après 30 ans passés au PTB.

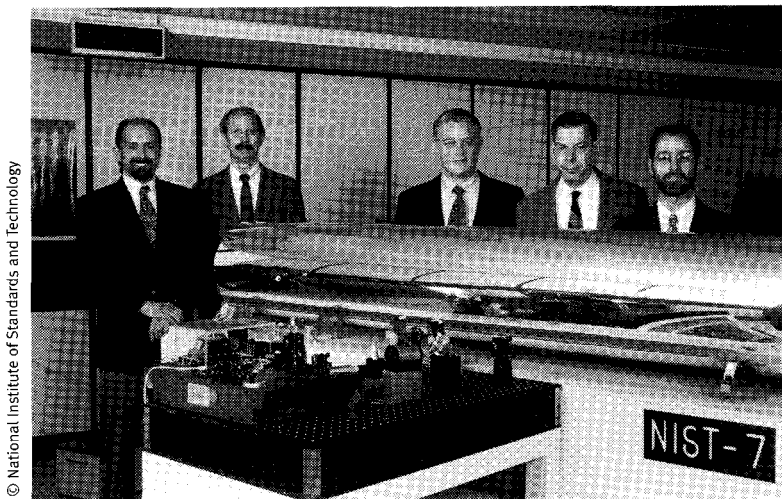
y a un four et un détecteur à chaque extrémité du tube – ce qui réduit notablement les sources d'erreur.

Les deux étalons les plus récents, CS3 et CS4, ont démarré en 1988 et 1992. La vitesse des atomes y a encore été réduite – à 70 mètres par seconde – et leurs tubes à faisceau sont pour cette raison installés à la verticale. Si on les avait montés à l'horizontale, comme leurs cousins plus anciens, les atomes tomberaient dans le champ de gravité terrestre d'un bout à l'autre de l'appareillage. À ce jour, CS3 et CS4 se sont avérés moins fiables que CS2, à tel point que CS4 n'a pas encore contribué à l'élaboration du TAI.

CS1 et CS2 fonctionnent en continu comme horloges aussi bien que comme étalons de fréquence. CS2, outre son rôle de fournisseur de l'UTC pour l'Allemagne, est aussi l'étalon le plus fiable contribuant au TAI.

### Le pompage optique

Les horloges du PTB ont longtemps trôné au sommet de la hiérarchie des étalons de fréquence, mais ce règne a pris fin en 1995, avec l'étalon le plus récent de l'Institut national américain des Étalons et de la Technologie (NIST, le nouveau nom du NBS). Le NIST-7 (voir la figure 28) est, vous l'avez deviné, le septième d'une lignée d'étalons remontant au NBS-1, l'appareil à jet de césium dont nous avons parlé plus haut (c'est en tout cas le nom qu'il reçut



28. L'une des horloges les plus précises du monde, NIST-7, représentée ici en compagnie de l'équipe qui en est responsable, John P. Lowe, Robert E. Drullinger (chef de projet), David J. Glaze, Jon Shirley et David Lee, tous de l'Institut national américain des étalons et de la technologie (NIST). Cet étalon à jet de césium à pompage optique atteint une précision de 2 secondes pour 10 millions d'années.

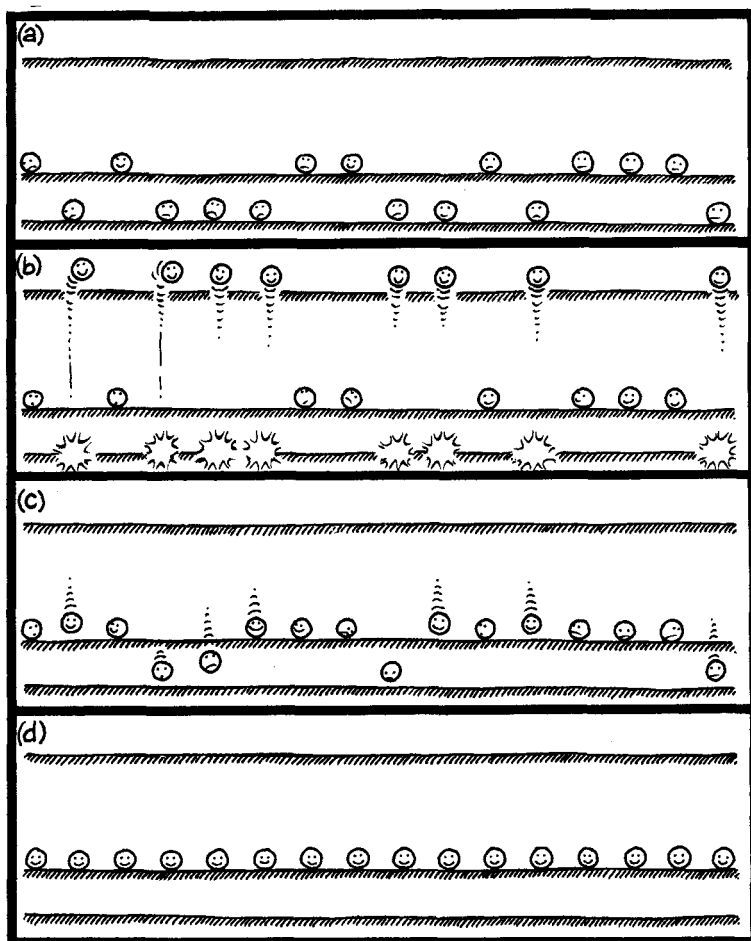
lorsqu'il fut reconstitué après son déménagement à Boulder, dans l'état du Colorado, en 1958).

NIST-7 fonctionne sur le même principe que les horloges du PTB, mais il fait un usage plus efficace des atomes de césium. Dans un étalon classique, les atomes de césium sont triés par un filtre magnétique selon l'état hyperfin dans lequel ils se trouvent. NIST-7 n'utilise pas de sélecteur magnétique, mais une méthode connue sous le nom de pompage optique (*voir la figure 29*). Après leur sortie du four, les atomes de césium rencontrent un faisceau laser dont les photons ont l'énergie nécessaire pour les faire passer de l'état hyperfin bas dans un autre état, d'énergie supérieure à celle des deux niveaux hyperfins. Tous les atomes de césium dans l'état hyperfin bas sont « propulsés » dans ce troisième état, alors que les autres atomes, ceux dans l'état hyperfin haut, traversent le faisceau laser sans le voir. Quelques nanosecondes plus tard, les électrons « propulsés » décident de redescendre mais, et c'est là le point crucial, si la moitié d'entre eux redescend vers leur niveau d'origine (hyperfins bas), l'autre moitié se retrouve en fait sur l'état hyperfin haut ; le bilan net d'un seul cycle est d'expédier la moitié des électrons de l'état hyperfin bas vers l'état hyperfin haut. Comme il y a plusieurs cycles et que le laser continue à fonctionner pendant ce temps, un flash de lumière laser envoie presque tous les atomes dans l'état hyperfin haut<sup>10</sup>. Ces atomes sont alors prêts à traverser la cavité de Ramsey.

À ce stade, on se retrouve dans une situation familière. Si les micro-ondes ont une fréquence proche de la transition hyperfine du césium, un certain nombre d'atomes subissent cette transition et passent dans le niveau bas. Quand le jet atomique sort de la cavité, il comporte un mélange d'atomes dans les deux états. On excite alors ceux qui sont encore dans l'état bas à l'aide d'un laser. En

---

10. Le phénomène de pompage optique a valu en 1966 le Prix Nobel de physique à Alfred Kastler, du laboratoire de l'École Normale Supérieure de Paris. L'opération pour laquelle tous les atomes se retrouvent dans un état excité s'appelle l'inversion de population. (N.d.T.).



29. Le pompage optique. (a) Dans un paquet d'atomes de césium « normaux », la moitié des électrons se trouvent dans l'état hyperfin le plus bas et l'autre moitié est dans l'état haut. (b) Quand on éclaire ces atomes avec un faisceau de lumière de la bonne longueur d'onde, les électrons dans l'état bas sont « propulsés » dans un troisième état, d'énergie encore plus élevée que celles des deux états hyperfins. (c) Les électrons ainsi excités ne tardent pas à redescendre : pour moitié, ils vont peupler l'état hyperfin haut, et pour moitié l'état hyperfin bas. (d) Après plusieurs cycles similaires, tous les électrons se retrouvent dans l'état hyperfin haut ; il ne reste plus qu'à les exposer au faisceau de micro-ondes.



retombant du niveau haut vers le niveau bas, ceux-ci émettent des photons que l'on détecte. Plus on en détecte, plus il y avait, au sortir de la cavité, d'atomes dans l'état le plus bas, ce qui signifie que la fréquence des micro-ondes est proche de la fréquence de transition du césium.

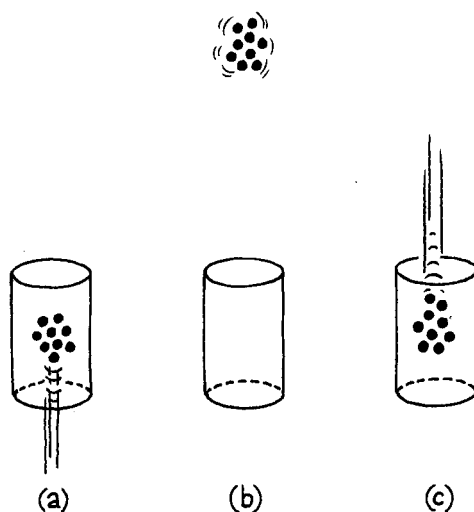
La beauté de cette sélection optique des états réside dans le fait que tous les atomes de césium y sont utilisés et qu'aucun n'est perdu. Comme il n'y a pas de filtre magnétique, les atomes volent en ligne droite d'un bout à l'autre de l'appareillage, ce qui réduit les sources d'erreur. En conséquence, comme NIST-7 est capable de détecter les atomes ayant subi la transition avec une meilleure efficacité et une meilleure fiabilité que les étalons plus conventionnels, il atteint une meilleure précision. Il existe trois autres étalons primaires à pompage optique, un en France et deux au Japon, qui ont suivi la voie inaugurée avec NIST-7.

### **Les fontaines à césium**

J'ai déjà évoqué Jerrold Zacharias, le physicien du MIT qui sidéra le monde scientifique en lançant sur le marché une horloge au césium à peine un an après les débuts de la première horloge du NPL. Quelques années auparavant, Zacharias avait eu une idée encore plus radicale en ce qui concerne les horloges atomiques. Nous avons vu que la précision d'une horloge dépend du temps que passent les atomes entre les deux branches du U dans la cavité de Ramsey – plus ce temps entre deux expositions aux micro-ondes est long, plus stable est la fréquence de l'horloge. Zacharias s'était dit qu'au lieu de catapulter les atomes dans une cavité horizontale à 200 mètres par seconde, il vaudrait bien mieux les lancer à la verticale, comme dans une fontaine.

Plus précisément, l'idée était de faire sortir les atomes du four vers le haut, d'attendre qu'ils freinent sous l'action de la gravité terrestre jusqu'à s'arrêter, puis retombent en chute libre. On pourrait alors les exposer deux fois au même faisceau de micro-ondes, une

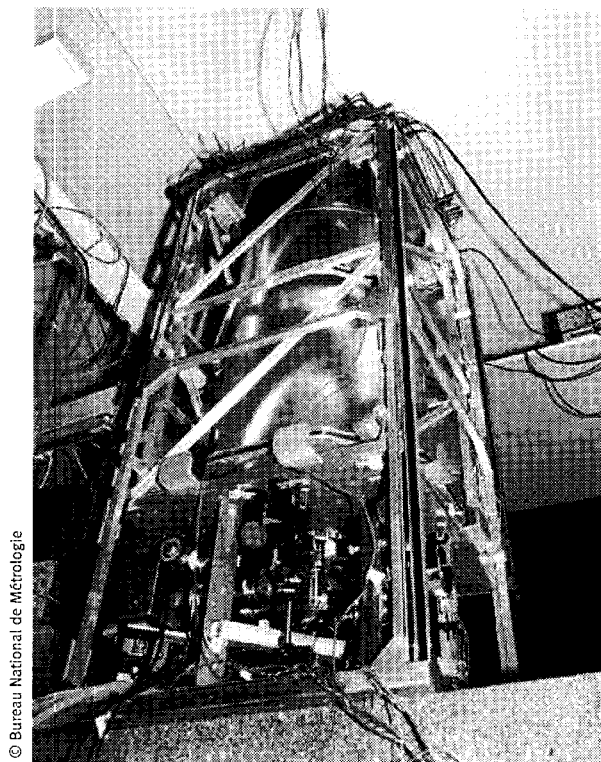
fois sur leur chemin vers le haut et une fois vers le bas (*voir la figure 30*). Imaginons de plus que l'on soit capable de n'utiliser que les atomes les plus lents sortant du four ; l'intervalle de temps entre deux expositions aux micro-ondes atteindrait alors une seconde – 200 fois plus que dans les appareils à jets de césium de l'époque. En 1953, Zacharias commença la construction d'un appareillage de 5 mètres de haut, le Fallotron<sup>11</sup>. Ce prototype ne fonctionna jamais, car les atomes les plus lents nécessaires à son fonctionnement étaient éjectés du jet par des collisions avec les atomes plus rapides.



30. Le principe de la fontaine à césium. (a) En allant vers le haut, un nuage d'atomes de césium refroidis traverse une cavité où ils sont exposés à des micro-ondes. (b) Les atomes atteignent le sommet de leur trajectoire et s'arrêtent avant de redescendre. (c) Lors de leur second passage dans la cavité, ils sont à nouveau exposés aux micro-ondes. Le temps d'interaction – c'est-à-dire l'intervalle de temps entre les deux expositions – est bien plus long que dans un étalon à jet de césium, ce qui permet de définir la fréquence de transition bien plus précisément.

11. Que l'on pourrait peut-être traduire par Chutotron ; en anglais, fall signifie chute (N.d.T.).

Il fallut attendre les années 1990 pour que de nouveaux progrès en physique ramènent l'idée de Zacharias sur le devant de la scène. La première « fontaine à césium » a été construite par le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF) de l'Observatoire de Paris, où elle fonctionne depuis 1995 (voir la figure 31). Des nuages comportant des millions d'atomes de césium y sont lancés chaque seconde. Cette horloge, LPTF-FO1, atteint aujourd'hui une précision sans égale de deux parties pour  $10^{15}$ , et elle contribue déjà au TAI.



© Bureau National de Métrologie

31. La première fontaine à césium opérationnelle, LPTF-FO1, contribue au TAI depuis 1995. Située à l'Observatoire de Paris, elle est actuellement l'étalon de fréquence le plus précis au monde, avec une stabilité meilleure qu'une seconde en 10 millions d'années.

Une seconde fontaine, NIST-F1, a été intégrée au TAI à la fin 1999. Les promesses des fontaines à césium sont si grandes que plus personne ne construit aujourd'hui d'étalons classiques à jet de césium. Les fontaines, voilà l'avenir, comme nous le verrons au dernier chapitre.

### **Les horloges secondaires**

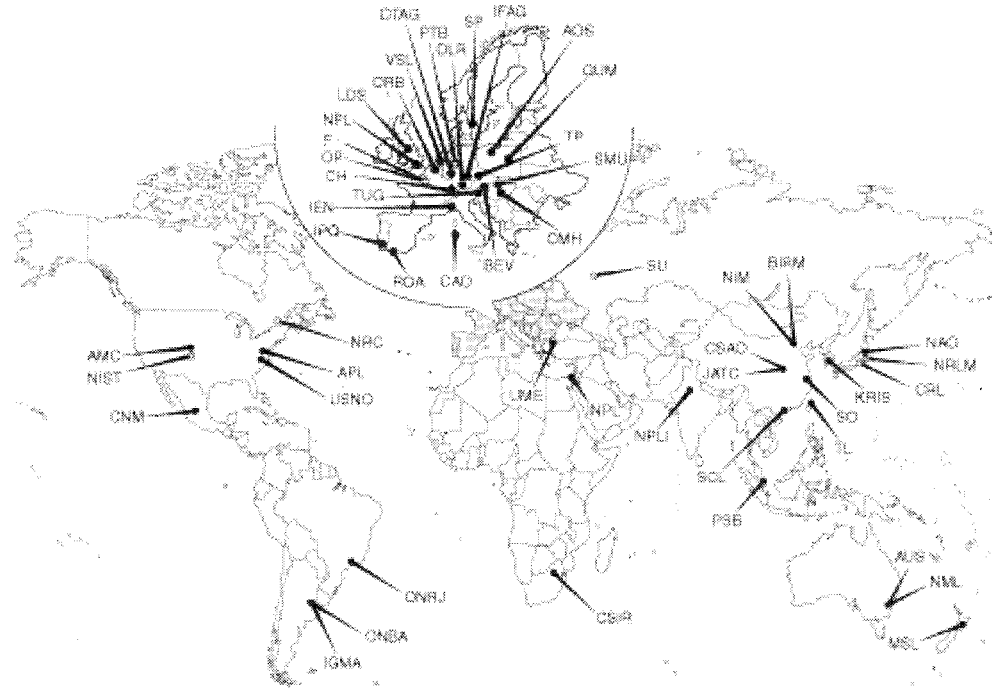
Si le système de mesure mondial du temps devait s'appuyer uniquement sur ces quelques étalons primaires, il serait bien précaire ! Comme nous l'avons vu, seul un petit nombre d'entre eux fonctionnent en continu. Comment diable fait-on pour garder la trace de l'heure qu'il est quand la plupart des étalons primaires sont arrêtés ?

Le TAI « tourne en continu » grâce aux efforts combinés d'un ensemble de 260 horloges atomiques, étalons secondaires répartis entre les divers laboratoires mondiaux de mesure du temps (*voir la figure 32*). L'emploi d'un échantillon si vaste garantit qu'on ne pourra pas perdre un seul cycle du temps atomique. Toutefois, ce n'est pas la seule raison : si on analyse correctement l'ensemble des signaux fournis par tous ces étalons, l'échelle de temps qui en résulte est bien plus stable que celle de la meilleure horloge de l'ensemble. Ces horloges secondaires se répartissent en deux familles : les horloges industrielles au césium, et les masers à hydrogène.

### **Les horloges industrielles au césium**

La majorité des 260 horloges atomiques contribuant au TAI sont des étalons industriels au césium. Leur principe est identique à celui des étalons primaires, mais ils sont fabriqués de façon industrielle ; on peut presque les trouver « en rayon ». Ce sont des sortes de « boîtes noires » utilisables par pratiquement n'importe qui. Quand l'horloge a épuisé son césium, il suffit d'aller acheter un tube de rechange.

Ces étalons industriels sont plus compacts que les étalons primaires, dont le tube peut mesurer un mètre ou plus. La cavité de Ramsey qu'ils contiennent ne peut dépasser 15 centimètres de long,



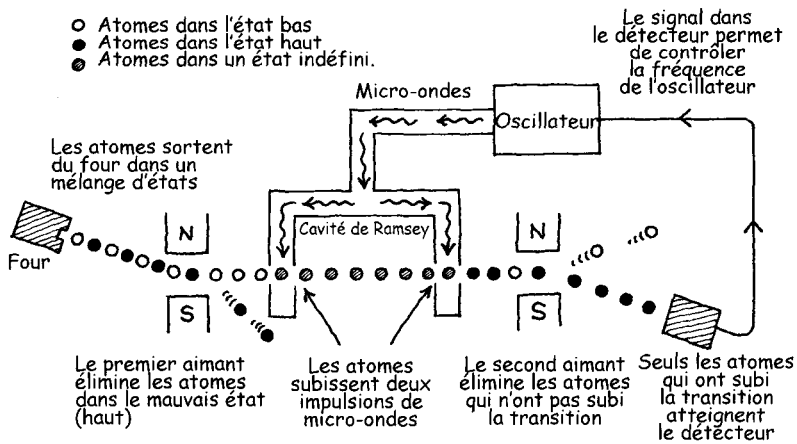
32. Le temps UTC est constitué à partir des efforts collectifs d'une cinquantaine de centres de recherche au monde. Chacun d'entre eux entretient une ou plusieurs horloges atomiques.

Sur cette carte, tous ces centres sont indiqués par un disque noir ; les sept centres qui détiennent des étalons primaires sont indiqués par un disque clair.

ce qui limite leur précision. Le four et le détecteur sont situés hors du prolongement de l'axe du tube, ce qui fait que seul l'un des états hyperfins traverse la cavité (voir la figure 33). Par conséquent, les atomes qui n'ont pas subi de transition atteignent rarement le détecteur, et les atomes les plus rapides sont éliminés avant de pénétrer dans la cavité. Avant d'arriver sur le détecteur, le jet d'atomes peut traverser un dispositif qui élimine tout atome contaminant. Ces précautions sont prises pour compenser l'inconvénient que représente la petite taille du tube.

Récemment, un nouveau type d'horloge à césium, la HP 5071A du constructeur Hewlett-Packard, a fait une percée dans les centres de mesure du temps. Inaugurée le 31 décembre 1990, la HP 5071A bénéficie d'un nouveau type de tube de faisceau et d'électronique de contrôle qui la rendent dix fois plus précise et dix fois

**Horloge industrielle au césium**



33. Bien que semblables dans leur principe, les horloges industrielles au césium sont plus compactes et plus robustes que les étalons primaires au césium (voir la figure 21). La différence principale est que le four et le détecteur sont décalés par rapport à l'axe du tube du faisceau de césium. La cavité de Ramsey ne mesure que 15 centimètres de long.

moins sensible aux perturbations extérieures que les précédents modèles. Sa stabilité à long terme, souvent d'une partie pour  $10^{14}$  sur une période de 40 jours, est telle qu'elle donnerait encore l'heure exacte à une seconde près dans 1,6 million d'années. La HP 5071A est devenue si « populaire » qu'elle représente près de la moitié du parc des horloges industrielles contribuant au TAI, et qu'elle compte même pour 80 pour cent dans son calcul. Résultat net de sa mise sur le marché : la stabilité du TAI et de l'UTC s'est améliorée d'un facteur 10 au cours des années 1990.

### **Les masers à hydrogène**

Au début des années 1960, alors que les horloges à césium commençaient à révolutionner la mesure du temps, un autre type d'horloge semblait très prometteur. Au chapitre 2, nous avons vu que l'atome d'hydrogène présente une transition « d'horloge » à 1 420 mégahertz entre les deux sous-niveaux hyperfins de son état fondamental. En 1960, un groupe de physiciens de Harvard conduit par Norman Ramsey (l'inventeur de la cavité de Ramsey utilisée dans les étalons à jet de césium) construisit le premier maser à hydrogène.

L'hydrogène sous forme gazeuse y est d'abord chauffé dans une lampe à décharge électrique jusqu'à ce que ses molécules se séparent en deux atomes d'hydrogène. Ces atomes sont, sous bien des aspects, semblables aux atomes de césium : ils sont répartis équitablement entre les deux sous-niveaux hyperfins de l'état fondamental. Comme dans un étalon industriel au césium, un jet d'atomes d'hydrogène traverse un aimant qui sélectionne les seuls atomes se trouvant dans l'état hyperfin haut. Ces atomes poursuivent leur chemin dans le reste de l'appareillage mais, au lieu de traverser une cavité, ils sont piégés dans un ballon de quartz dont l'intérieur est tapissé de Téflon, le matériau des poêles qui n'attachent pas. Grâce à ce Téflon (je vous assure que ce n'est pas une plaisanterie !), les atomes d'hydrogène ne restent pas collés aux parois mais rebondis-

sent à l'intérieur de la lampe durant une seconde. Pendant ce temps, on leur envoie une impulsion micro-onde de fréquence proche de leur fréquence de transition.

À ce moment, comme vous vous en doutez, si la fréquence correspond au mieux à celle de la transition hyperfine, les électrons retournent dans l'état bas tandis que l'atome émet un photon qui a exactement la même fréquence. Si l'on travaille dans les bonnes conditions, ces micro-ondes émises peuvent être détectées dans un récepteur et utilisées pour stabiliser un oscillateur à quartz.

Ce type de maser à hydrogène se révèle supérieur aux horloges à césium sur des durées allant de quelques secondes à quelques jours, pour lesquelles il atteint une partie pour  $10^{15}$ . Cela le rend indispensable comme étalon pour des applications exigeant la meilleure précision possible, telle que la radioastronomie (*voir le chapitre 7*), mais sur le long terme, sa stabilité est moins bonne que celle des étalons à césium. Notons néanmoins qu'environ 50 masers à hydrogène contribuent au TAI ; ils sont particulièrement en vogue en Russie. Aucun n'est utilisé comme étalon primaire. Le NPL en possède deux, dont un est l'horloge qui fournit l'UTC au Royaume-Uni.

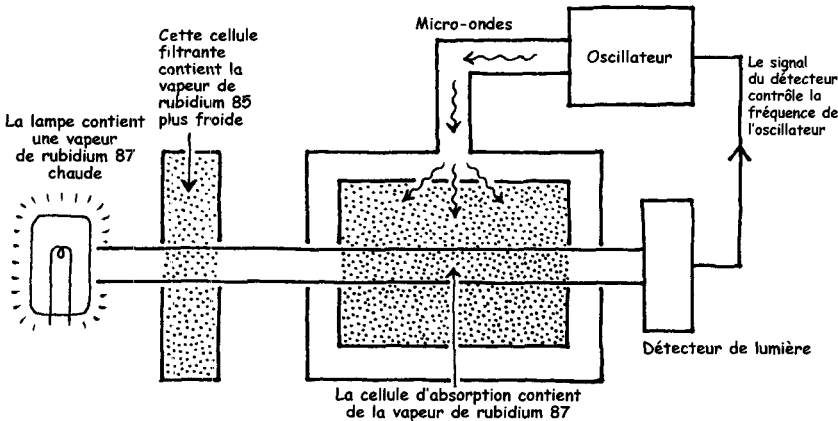
### **Les horloges à rubidium**

Une dernière catégorie d'horloge atomique doit être mentionnée, dont l'emploi est très répandu, bien qu'elle ne contribue pas au TAI. Peu après leur découverte du césium en 1860, les spectroscopistes Bunsen et Kirchhoff tombèrent sur un nouveau métal. Celui-ci avait une paire de raies spectrales rouge vif semblables à celles – jaunes – du sodium, et ils le baptisèrent « rubidium » par allusion à cette teinte rubis. On découvrit par la suite que le rubidium était un autre de ces métaux alcalins, comme le césium, comportant le même type d'électron externe célibataire qui fait du césium le matériau de choix pour les horloges atomiques. Toutefois, contrairement au cas du césium, il existe deux isotopes stables du rubidium. Le rubidium 85



(environ 72 pour cent du total) a une fréquence de transition de 3 035 mégahertz ; les 28 pour cent restants sont du rubidium 87, avec une fréquence de transition de 6 835 mégahertz. Les deux malheureux neutrons supplémentaires du rubidium 87 changent du tout au tout les propriétés magnétiques du noyau, d'où cette énorme différence entre les fréquences de transition hyperfine.

Les horloges à rubidium ne fonctionnent pas comme les horloges au césium. Une lampe contenant du rubidium 87 très chaud émet une lumière contenant le fameux doublet rouge à 780 et 795 nanomètres (voir la figure 34). Cette lumière traverse ensuite une cellule contenant du rubidium 85 plus froid ; à cause de la différence entre les structures hyperfines de l'état fondamental des deux isotopes, la lumière en émerge subtilement modifiée : si on la dirige à présent sur une cavité contenant une vapeur de rubidium 87, la lumière est absorbée par les atomes dans l'état hyperfin bas, mais pas par ceux qui sont dans l'état haut. D'une manière assez semblable au pompage optique dans l'étalon primaire NIST-7, les atomes de



34. Les étalons au rubidium, moins sophistiqués, sont utilisés comme horloges atomiques quand une précision ultime n'est pas requise. La cellule d'absorption s'assombrit lorsque les micro-ondes sont ajustées sur la fréquence de transition à 6 835 mégahertz.

rubidium 87 se retrouvent alors presque tous sur le niveau hyperfin haut. Quand il ne reste plus assez d'atomes dans l'état hyperfin bas, la vapeur ne peut plus absorber de lumière et elle devient transparente. La vapeur est alors exposée à des micro-ondes proches de la fréquence de transition de 6 835 mégahertz, et les électrons retombent dans l'état hyperfin bas. Les atomes sont à nouveau capables d'absorber la lumière, et la cellule redevient sombre. L'idée est donc d'ajuster la fréquence radio d'un oscillateur à quartz jusqu'à ce que la cellule s'assombrisse : on sait alors que la fréquence de l'oscillateur est accordée sur la fréquence hyperfine du rubidium 87.

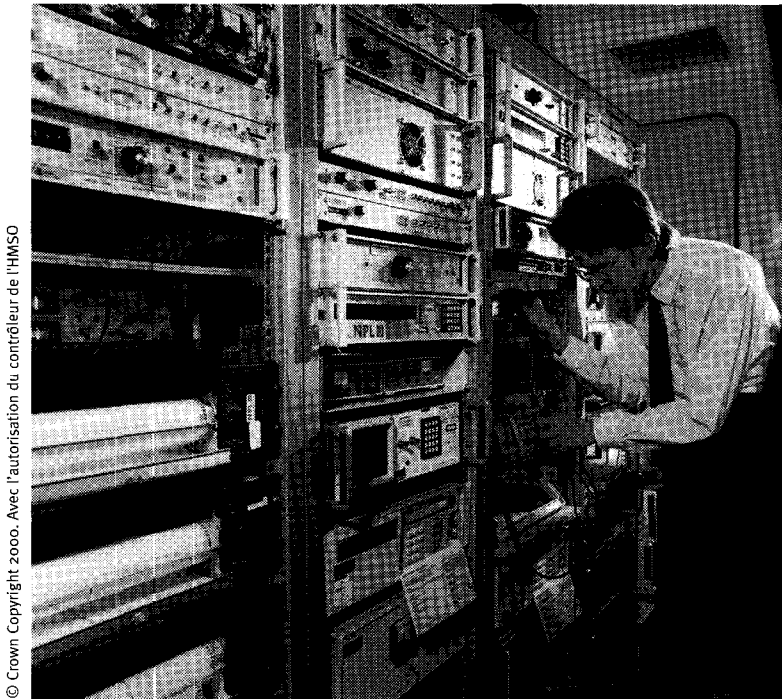
Ses performances ne permettent pas à l'horloge à rubidium de faire de l'ombre au césium – sa précision est moins bonne et elle vieillit mal. Son grand avantage est son coût peu élevé et son volume réduit. Elle est tout de même plus stable que les horloges à quartz, et maintient une précision fort respectable sur une journée, d'environ une partie pour  $10^{13}$ . Des horloges à rubidium stabilisées sont utilisées dans les satellites du fameux système américain GPS (système de positionnement global, développé par l'armée américaine, et maintenant accessible au public). Nous reviendrons sur le GPS au chapitre 6.

### **Comment on « manufacture » le temps**

Dans la pratique, comment combine-t-on tous ces étalons primaires et ces horloges atomiques pour obtenir le TAI et l'UTC ? Au chapitre 2, nous avons vu que toute horloge est constituée de deux parties : un oscillateur et un compteur. Bien qu'elle n'existe que sur le papier, l'horloge virtuelle du TAI repose sur le même principe : les étalons primaires fournissent l'oscillateur et les horloges atomiques des divers centres nationaux forment le compteur. Cet ensemble d'horloges joue aussi le rôle d'un « volant » qui régularise le fonctionnement de l'horloge TAI, même quand l'oscillateur est arrêté. Tout se passe comme s'il se « souvenait » des ajustements périodiques réalisés à partir des étalons primaires.

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

La lourde tâche de la production et de la distribution d'une échelle de temps à partir de cet ensemble dispersé d'horloges incombe au personnel de la section du temps du BIPM qui l'a élevée au statut d'un art. La première étape consiste à réunir toutes les informations temporelles provenant de l'ensemble des 260 horloges. Le NPL, par exemple, est responsable de six d'entre elles, dont une fournit l'UTC au Royaume-Uni (voir la figure 35). Cette



© Crown Copyright 2000. Avec l'autorisation du contrôleur de l'HMSO

35. Le scientifique Andrew Lowe, du NPL, en pleine action dans le centre de mesure du temps du laboratoire. Deux des six horloges atomiques du NPL sont visibles au bas de la photographie (elles ont leur capot ouvert). L'unité située au milieu de l'image (celle qui a un logo NPL) affiche l'UTC(NPL) – c'est-à-dire la version de l'UTC pour le Royaume-Uni – lui-même tiré d'un maser à hydrogène situé dans la cave. Le reste de l'équipement visible ici sert soit à suivre les signaux horaires émis par des stations radio émettant des fréquences étalons, soit à capter les signaux émis par les satellites du GPS.

version nationale de l'UTC se nomme l'UTC(NPL). Une fois par heure, les six horloges sont comparées automatiquement entre elles, et les différences sont enregistrées avec une précision d'une nanoseconde. À la fin de chaque mois, le NPL et la cinquantaine de laboratoires nationaux compilent leurs mesures en les regroupant par blocs de cinq jours. Ensuite, ils les envoient par courrier électronique au BIPM, sous la forme d'un « formulaire électronique » standardisé.

L'ensemble de ces informations indique au BIPM comment les diverses horloges se comparent à leur UTC local, mais il n'est pas en soi suffisant pour confronter les diverses versions existantes de l'UTC : comment s'écoule, disons, l'UTC du NPL par rapport à celui du PTB allemand, ou celui du NIST américain ?

Cette analyse est aujourd'hui réalisée par l'intermédiaire du GPS, le réseau de satellites de navigation mis en place par le Département de la Défense des États-Unis. Chacun des satellites émet des signaux horaires fondés sur sa propre horloge atomique. Trente fois par jour, le récepteur GPS du NPL suit l'un de ces satellites, et compare automatiquement ces signaux horaires à l'UTC (NPL). Tous les centres nationaux de la planète font de même de leur côté, en suivant un plan établi à l'avance par le BIPM, de manière à ce que des centres différents observent les mêmes satellites au même instant. Grâce à ces comparaisons simultanées, le BIPM est ensuite capable, au terme d'une procédure complexe, de calculer les écarts entre chaque UTC local et l'UTC de l'Observatoire de Paris, ou UTC (OP).

Chaque fin de mois, l'équipe du BIPM analyse les données temporelles des 30 jours précédents. Ils savent ainsi, tous les cinq jours, comment les horloges de chaque centre national diffèrent de l'UTC local, et ils savent aussi de combien chaque UTC local diffère de l'UTC(OP). De simples formules arithmétiques donnent alors une version de l'UTC pour chacune des 260 horloges du parc.

L'étape suivante consiste à calculer une sorte de moyenne de tous ces temps pour créer une « horloge moyenne virtuelle ». L'échelle de temps de cette « horloge » s'appelle l'Échelle Atomique Libre (EAL). Dans le calcul de cette moyenne, il faut attribuer à chacune des 260 horloges un « poids » qui traduit la confiance relative qu'on lui porte, et qui est déterminé par sa stabilité par rapport à l'EAL au cours de l'année écoulée. Notez que l'attribution du poids (on dit aussi la « pondération ») repose sur la pratique, sur le bon fonctionnement de l'horloge, et non pas sur le renom du fabricant ou la bonne réputation du modèle ou du laboratoire. Une horloge dont on sait qu'elle est restée proche de l'EAL reçoit ainsi plus de poids qu'une autre qui ne s'est pas aussi bien comportée, ou bien qui n'a été introduite que récemment dans le parc. Les horloges considérées comme les plus fiables ont un poids pouvant aller jusqu'à 0,7 pour cent du total des contributions à l'EAL ; une horloge très décevante peut recevoir un poids *nul* – ce qui signifie qu'on l'ignore pour cette période. La formule de pondération est conçue pour que les meilleures horloges dominent l'EAL, sans toutefois qu'un petit nombre d'entre elles puissent le déterminer complètement.

L'unité de temps de l'EAL ainsi déduite est ensuite comparée à la durée de la seconde SI, déterminée par les étalons primaires. Plusieurs fois par an, ces étalons adressent leurs mesures de la seconde SI au BIPM. À la fin des années 1990, l'unité de l'EAL était plus courte que la seconde SI, d'environ 7 parties pour  $10^{13}$ . Une fois l'unité de temps de l'EAL réajustée finement à la seconde SI, on obtient – enfin – le TAI. On estime aujourd'hui que la seconde du TAI est égale à la seconde SI à mieux que 4 parties pour  $10^{15}$ .

Il ne reste plus que l'étape finale, la conversion du TAI en UTC. Comme nous l'avons vu, l'UTC et le TAI ne peuvent différer que d'un nombre entier de secondes, et leur définition est telle qu'ils étaient exactement synchrones le 1<sup>er</sup> janvier 1958. Il est parfois nécessaire d'introduire (ou, en principe, de retrancher) une seconde supplémentaire dans l'UTC pour empêcher que celui-ci ne

s'écarte de l'UT1 – le temps lié à la rotation terrestre – de plus de 0,9 seconde. Ces secondes insérées sont dénommées secondes intercalaires. La lourde décision d'utiliser ou non une seconde intercalaire est prise par le Service International de la Rotation Terrestre (IERS), et nous allons décrire ce processus en détail dans le chapitre suivant. Au moment où ces lignes sont écrites, la dernière seconde intercalaire remonte au 31 décembre 1998 ; après son insertion, l'UTC avait exactement 32 secondes de retard sur le TAI. Le processus complexe que nous venons de décrire est résumé dans la figure 36.

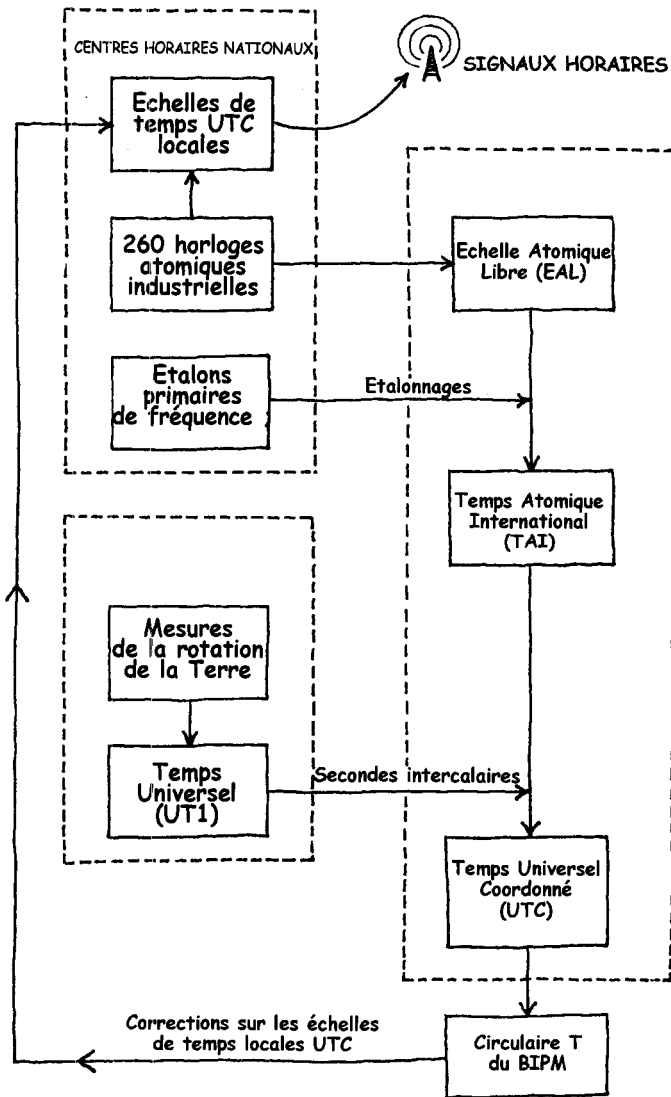
### **Le Temps Universel Coordonné (UTC)**

Partout sur la planète, l'heure légale est fondée sur l'UTC fourni par l'un des 49 centres horaires nationaux. Au Royaume-Uni, on le nomme UTC(NPL), en France l'UTC(OP), alors qu'en Allemagne, c'est l'UTC(PTB). Aux États-Unis, deux versions de l'UTC, celui du NIST et celui de l'USNO, sont disponibles. Chaque fois que vous entendez un signal horaire, à la radio ou bien au téléphone, il découle forcément de l'un ou l'autre de ces UTC locaux.

La plupart des laboratoires désignent, parmi leurs horloges, la « responsable » de leur UTC. D'autres préfèrent fabriquer une version « papier » de l'UTC, par moyenne entre plusieurs de leurs horloges, un peu comme le BIPM le fait à plus grande échelle ; cela permet souvent d'obtenir une échelle plus stable. Chacune de ces versions locales de l'UTC peut présenter une légère différence avec l'UTC diffusé depuis Sèvres. Ces écarts sont recensés dans un bulletin mensuel émis par le BIPM – la Circulaire T. Celle-ci comporte six pages de tables, contenant essentiellement un rapport destiné aux divers centres nationaux sur la qualité de leur UTC local par comparaison avec l'UTC du BIPM. On peut consulter cette circulaire sur le site web du BIPM.

Rien ne vaut les exemples ! Détaillons donc la Circulaire T émise le 20 décembre 1999, qui s'appuie sur les données enregistrées

# COMBIEN DURE UNE SECONDE ?



36. La fabrication du Temps Universel Coordonné (UTC) est une procédure complexe impliquant des douzaines d'organismes de différents pays.

tous les cinq jours entre le 28 octobre et le 27 novembre. Elle nous indique les écarts entre chaque UTC local et l'UTC diffusé par le BIPM. Au cours de cette période, l'UTC du Royaume-Uni retardait sur l'UTC, d'environ 60 à 80 nanosecondes. La palme du meilleur UTC local sur cette période revient aux Pays-Bas, avec un écart ne dépassant pas 10 nanosecondes ; les États-Unis et la Suède ne sont pas loin, avec respectivement 11 et 18 nanosecondes. Les plus grands écarts observés atteignent quelques microsecondes (ou milliers de nanosecondes), ce qui est largement suffisant pour la plupart des usages du temps. Grâce à cette circulaire, les utilisateurs qui le souhaitent peuvent « corriger » *a posteriori* leur UTC afin d'obtenir la meilleure précision possible. La Circulaire T liste également tous les étalonnages reçus des étalons primaires pendant cette période : LPTF-JPO, NIST-7, NRLM-4, ainsi que CS1, CS2 et CS3<sup>12</sup>. On y trouve aussi une comparaison entre l'UTC et le temps diffusé par les satellites de navigation, ainsi que les différences observées entre le TAI et 16 échelles de temps atomique locales. Toutes les informations contenues dans les circulaires T sont compilées dans le rapport annuel de la section du temps du BIPM, publié au mois de février.

Le système mondial de mesure du temps présente une curieuse particularité : seules des approximations locales de l'UTC sont disponibles « en temps réel ». Il faut attendre un mois pour connaître l'UTC officiel avec la meilleure précision. Une question se pose alors : que font donc les centres nationaux quand ils découvrent que leur UTC est vraiment éloigné de l'UTC officiel de la circulaire T ? La réponse est que c'est la stabilité qui prime. Si l'UTC local conserve un écart plus ou moins constant avec l'UTC, la règle est de *ne rien faire*. En revanche, si cet écart varie rapidement, alors il faut ajuster la (ou les) horloge(s) avant que la différence ne devienne trop importante.

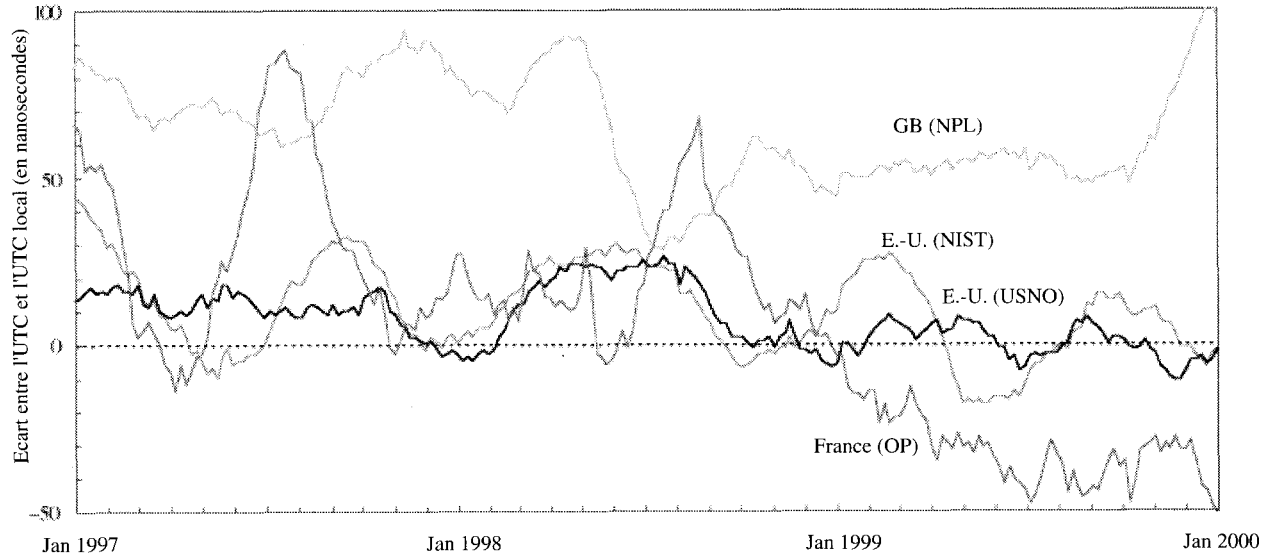
---

12. Pour interpréter ces sigles, reportez-vous à la figure 26, au début de ce chapitre, ou à la liste des sigles en fin d'ouvrage (N.d.T.).



Ces ajustements reçoivent le nom fort approprié de « pilotage », et ce sont des opérations délicates, comparable à la conduite d'un supertanker pétrolier. Pour commencer, quand on s'aperçoit qu'il faut faire quelque chose, c'est grâce à la circulaire T, c'est-à-dire assez tard. Une correction de pilotage a un effet immédiat, bien que le laboratoire qui l'a effectuée n'en connaîtra pas le résultat avant de nombreuses semaines. Une chose est sûre : on ne règle pas une horloge atomique comme une montre bracelet. On ne peut pas se contenter de tourner les aiguilles à la main, bien que dans certains cas, heureusement rares, il faille recourir à ce genre de méthodes brutales. En général, on procède plus graduellement : la méthode normale est de faire varier le battement de l'horloge d'une faible quantité, dénommée « pas en fréquence ». Imaginons que notre horloge avance en permanence de 100 nanosecondes par rapport à l'UTC, et que nous souhaitions réduire cet écart. On pourrait le faire à raison de moins 1 nanoseconde par jour pendant 100 jours. Pendant ce temps, notre horloge se rapprochera lentement de l'UTC. Environ 100 jours plus tard, quand notre horloge sera proche de l'UTC, nous pourrions appliquer la correction opposée, un pas en fréquence de plus 1 nanoseconde par jour, et cela devrait suffire à l'y maintenir. (Évidemment, nous n'aurons confirmation du bien fondé de la manœuvre que quelques semaines plus tard !) La pratique n'est pas aussi simple, et même les laboratoires les plus modernes doivent piloter leurs horloges *en permanence*, un coup en avant et un coup en arrière, pour s'assurer qu'elles restent proches de l'UTC. La figure 37 présente les performances de quelques centres nationaux sur une durée de trois ans.

Malgré ces difficultés, la situation s'améliore ; les écarts à l'UTC se sont considérablement réduits ces dernières années. Dans les années 1980, mêmes des laboratoires de pointe s'écartaient parfois de plusieurs microsecondes de l'UTC ; aujourd'hui, leur écart dépasse rarement quelques dizaines de nanosecondes. Cette meilleure précision résulte en partie de l'acquisition ou de la fabri-



37. Quelques UTC particulièrement performants. On recommande aux centres nationaux de conserver leur version locale de l'UTC à moins de 100 nanosecondes de l'UTC du BIPM. Sur cette figure, on voit que l'USNO se comporte particulièrement bien, mais il faut dire que ses nombreuses horloges

atomiques pèsent lourd dans la moyenne. Des variations importantes peuvent être observées, par exemple ici à l'été 1997 pour OP (l'Observatoire de Paris) ; elles sont dues à de légers ajustements du taux de l'UTC local pour le rapprocher de l'UTC.

cation de meilleures horloges, entre autres la HP 5071A et les masers à hydrogène, et de leur maintien dans un environnement soigneusement contrôlé. Une autre raison tient aux efforts accrus pour maintenir chaque UTC local plus proche de l'UTC mondial. Le BIPM exige aujourd'hui que les centres nationaux maintiennent en toute circonstance leur UTC local à moins d'une microseconde (soit 1 000 nanosecondes) de l'UTC, et de préférence à moins de 100 nanosecondes. La plupart des temps locaux satisfont la première condition, mais pas la deuxième.

### **L'étrange destin de l'heure de Greenwich**

En 1975, la CGPM recommanda que l'UTC devienne la base de toutes les heures légales dans tous les pays, remplaçant ainsi l'heure moyenne de Greenwich (*Greenwich Mean Time*, ou GMT)<sup>13</sup> dont la définition n'était plus assez claire. L'ironie veut que cette recommandation sensée ait été adoptée par la plupart des pays industrialisés, à l'exception... du Royaume-Uni.

À ce jour, l'heure légale du Royaume-Uni demeure donc le GMT, bien que ce dernier ne soit plus employé à usage scientifique depuis les années 1920, et qu'il ait été remplacé par le Temps Universel UT, lui-même subdivisé en UT0, UT1 et UT2 depuis les années 1950. Les implications pour le GMT ? Personne ne sait trop quoi en dire ! À l'origine, le GMT était défini comme le temps solaire moyen déterminé par les observations faites à Greenwich ; on pourrait imaginer de l'interpréter aujourd'hui comme un UT0, l'heure d'un observatoire donné. Si on le considère comme la base de l'heure mondiale, comme il le fut à partir de 1884, alors c'est UT1 qui semblerait plus approprié, car les astronomes de l'époque auraient sûrement effectué la correction de mouvement des pôles s'ils avaient été conscients de son existence. On pourrait aussi

---

13. Rappelons que Greenwich a longtemps été le siège de l'Observatoire Royal de Grande-Bretagne (N.d.T.).

défendre la cause d'un temps UT2 (UT1 débarrassé de ses fluctuations saisonnières) car celui-ci est plus proche d'une échelle uniforme que le GMT était censé représenter. En tout cas, ce ne peut être l'UTC, car le GMT ne s'est jamais mélangé avec toutes ces horloges atomiques ni ces secondes intercalaires. Qu'en dire finalement ? Peut-être bien que le GMT existe dans une sorte de limbe réservé aux échelles de temps plus tout à fait vivantes et pas encore vraiment mortes. Dans ce cas, il ne diffère pas de l'UTC de plus d'une seconde.

En revanche, il est certain qu'il n'existe aucune horloge au monde qui donne l'heure GMT. Même au Royaume-Uni, la BBC et l'horloge parlante donnent l'UTC depuis 1972, et quand les sujets britanniques règlent leurs montres, ils le font sur l'UTC. Si l'on va par là, même *Big Ben* sonne l'UTC, en tout cas aussi précisément qu'elle en est capable. En dépit de cela, les Britanniques sont persuadés que leurs montres et horloges donnent le GMT, du moins en hiver<sup>14</sup>.

Cette anomalie se devait d'être corrigée, et c'était le but avoué de la Proposition de Loi sur le Temps Universel Coordonné, présentée devant la Chambre des Lords en juin 1997 par Lord Tanlaw. Il y faisait observer très justement que l'heure du Royaume-Uni était dorénavant basée sur l'UTC, et non sur le GMT qui, bien que légal, n'avait aucune existence définie et s'écartait même de l'UTC d'une quantité non spécifiée, pouvant atteindre 1 seconde. Naturellement, un tel écart est faible, mais pourquoi garder une heure légale non définie, qui ne soit pas l'heure donnée par les diverses horloges, et qui, de plus, fluctue en fonction de variations saisonnières imprévisibles de la rotation terrestre ? Sans parler des problèmes qui pourraient se poser avec certains documents légaux quand la datation était un point essentiel, par exemple les ordinateurs

---

14. Comme dans tous les autres États de l'Union Européenne, les montres du Royaume-Uni sont avancées d'une heure entre le dernier week-end de mars et le dernier week-end d'octobre de chaque année (N.d.T.).

et autres dispositifs tirant directement leur heure de l'UTC. La proposition de Tanlaw était très simple : remplacer toute mention légale du GMT par celle de l'UTC. Conscient de l'enthousiasme que montrait le gouvernement nouvellement nommé pour une digne célébration du millénaire à venir, il ajoutait : « Quand le monde entier a les yeux rivés sur Greenwich et sur son histoire, au moment où un nouveau millénaire va débiter, il serait tragique que notre nation n'affiche pas l'heure exacte de ce moment crucial. »

La proposition de Tanlaw fut votée par les Lords le 14 juillet 1997 et transmise à la Chambre des Communes. Que lui arriva-t-il alors ? Eh bien, on n'y trouva pas le temps<sup>15</sup> de la voter !

---

*15. Toute proposition de loi transmise par les Lords et qui n'est pas votée aux Communes avant le mois de novembre suivant est automatiquement abandonnée. C'est ce qui arriva à la proposition de loi sur l'UTC (N.d.T.).*

# 5

## Les secondes intercalaires

Il peut paraître étrange de consacrer un chapitre entier à ces fameuses secondes intercalaires, mais la manière dont elles doivent être prises en compte de temps à autre dans l'UTC est longue et complexe. Commençons par la description d'un organisme, le Service International de la Rotation Terrestre (IERS), dont la seule et unique mission est de mesurer la rotation de la Terre et son orientation dans l'espace.

### **Le Service International de la Rotation Terrestre**

L'IERS est né le 1<sup>er</sup> janvier 1988. Il a repris les fonctions proprement astronomiques du BIH, dont les responsabilités en matière de temps atomique ont été simultanément transférées au BIPM. L'IERS a également repris les attributions du défunt Service International du Mouvement du Pôle, lui-même héritier du Service International des Latitudes qui suivit en permanence le mouvement polaire depuis 1899.

Outre ses responsabilités en matière de mesure du temps, l'IERS est aussi chargé de la définition du Système International de Référence Terrestre, qui fixe les positions exactes de plusieurs centaines de points de référence à la surface du Globe, avec une précision au centimètre. Ce système a de nombreuses applications en géologie et en géophysique. L'IERS définit et maintient également

le Système International de Référence Céleste, un système de positionnement largement utilisé par les astronomes, et fondé sur les positions mesurées précisément d'environ 500 galaxies lointaines. Ces deux systèmes sont liés par l'intermédiaire du suivi en continu de la rotation de la Terre.

Ce suivi consiste en des mesures, à intervalles réguliers, de cinq quantités spécifiant entièrement l'orientation de la Terre dans l'espace. Quatre d'entre elles décrivent la direction de l'axe de rotation : deux pour la position du pôle « au sol » par rapport à un pôle « de référence », et deux autres pour la direction dans laquelle pointe l'axe de rotation. La cinquième et dernière quantité, celle qui a un lien direct avec la mesure du temps, est dénommée Temps Universel UT1.

Au chapitre 3, nous avons vu comment le Temps Universel a été divisé à partir des années 1950 en UT0, UT1 et UT2. La mesure du Temps Universel par un seul observatoire correspond à UT0. Si on dispose de mesures d'UT0 faites par plusieurs observatoires, on peut corriger du mouvement oscillatoire du pôle pour obtenir UT1. UT1 est donc essentiellement une mesure de l'orientation de la Terre dans l'espace – l'angle dont celle-ci a tourné à partir d'un instant initial (arbitraire). Ce temps UT1 est le plus utile aux navigateurs faisant le point à partir du Soleil ou des étoiles, même si ceux-ci se font rares depuis l'apparition du GPS et autres moyens modernes.

Le troisième type de Temps Universel – UT2 – se déduit d'UT1 à l'aide d'une formule qui prend approximativement en compte les variations saisonnières de la rotation terrestre. UT2 est donc une échelle de temps plus uniforme, et elle était importante à ce titre dans les années 1950 et 1960 ; depuis la redéfinition de l'UTC en 1972, on l'évoque peu.

Le BIPM et l'IERS collaborent pour que l'UTC ne s'écarte jamais de plus de 0,9 seconde de l'UT1. Si une tendance qui conduirait UTC à dépasser cette limite est observée, l'IERS en

informe le BIPM, qui décide alors de l'insertion d'une seconde supplémentaire. Le présent chapitre révèle comment l'IERS mesure la rotation terrestre pour en déduire UT1, et comment on en vient à décider d'insérer une seconde intercalaire.

### La mesure de l'UT1

Toutes les méthodes de mesure d'UT1 requièrent une détermination de l'orientation de la Terre par rapport à d'autres corps extérieurs, tels que des galaxies, des étoiles, la Lune, ou bien des satellites artificiels de la Terre.

Jusque dans les années 1980, la mesure du Temps Universel nécessitait la détermination de l'instant du transit de certaines étoiles données, c'est-à-dire du moment où, du fait de la rotation de la Terre, l'une de ces étoiles traverse le méridien d'un observatoire donné. En fait, la quantité mesurée est tout bonnement le Temps Sidéral (*voir le chapitre 1*), que l'on corrige ensuite pour obtenir le Temps Universel – UT0 à proprement parler. La comparaison de nombreuses mesures d'UT0 par des observatoires différents permet d'en déduire UT1.

La méthode la plus simple repose sur un type particulier de télescope, le cercle méridien, utilisé pour la première fois par l'astronome danois Ole Römer en 1689 (*voir la figure 38*). La monture d'un tel télescope lui permet de balayer le ciel exclusivement le long du méridien, du nord au sud. Pour appliquer cette méthode, il faut au préalable connaître la position exacte de plusieurs étoiles dans le ciel. Imaginons que nous voulons utiliser l'étoile brillante Capella. La consultation de tables astronomiques nous apprend que, le 1<sup>er</sup> janvier 2000, Capella franchira le méridien à 05 : 16 : 42<sup>16</sup> de temps sidéral local, que l'on peut convertir en UT0 d'après une formule classique. Un peu avant cette heure, nous pointons le télescope

---

<sup>16</sup>. Nous utilisons ici la notation internationale conventionnelle représentant 5 heures 16 minutes et 42 secondes (N.d.T.).





© National Maritime Museum

38. Jusque vers la fin du XX<sup>e</sup> siècle, toute mesure du temps reposait sur le chronométrage du passage au méridien de certaines étoiles. Ce télescope spécialisé, le cercle méridien d'Airy, fut le « garde-temps » de l'observatoire royal de Greenwich entre 1851 et 1927, année où il fut remplacé par un instrument plus moderne. On peut voir l'objectif du télescope : c'est le cercle gris au centre de l'image. En vertu d'un accord international remontant à 1884, le méridien qui passe par ce télescope définit le méridien de référence, dit de Greenwich.

dans la direction où Capella va franchir le méridien, et nous attendons son passage. À l'instant précis du transit, nous connaissons la valeur d'UT0, ce qui nous permet de régler notre horloge locale. Si nous disposons d'un équipement automatisé, nous pouvons mesurer le Temps Universel avec une précision de quelques millisecondes en utilisant un tel cercle méridien.

Il existe un dispositif plus perfectionné, le tube photographique zénithal, ou PZT, un télescope fixe qui pointe uniquement au zénith. Conçu en 1909, le PZT a longtemps été – jusqu'à tout récemment – l'instrument de mesure de la rotation terrestre le plus précis. L'image d'une petite zone de ciel située à la verticale exacte y est réfléchiée par une sorte de « piscine de mercure » (qui permet de définir avec précision l'horizontale locale) ; on enregistre alors, à quatre reprises, sur une plaque photographique mobile, l'image des étoiles ainsi que l'instant où cette image est enregistrée. Une mesure fine des positions stellaires sur la plaque fournit alors le temps de transit avec une grande précision. Avantage supplémentaire : comme le PZT est aligné sur le zénith, on en déduit en même temps la latitude de l'observatoire, ce qui permet de suivre le mouvement des pôles. Des PZT ont été utilisés par l'USNO dans les années 1950 pour relier le Temps Universel au Temps des Éphémérides, lors de l'étalonnage de la seconde atomique.

Le dispositif le plus récent destiné à la mesure de la rotation terrestre à l'aide des étoiles est l'astrolabe de Danjon, le même Danjon qui proposa le premier la notion de Temps des Éphémérides dans les années 1920. Employé pour la première fois en 1951, l'astrolabe permet de déterminer l'instant auquel une étoile donnée atteint une hauteur d'exactly 30 degrés sur l'horizon. Cet astrolabe pointe dans n'importe quelle direction, ce qui permet de mesurer bien plus d'étoiles que ne le permet un cercle méridien ou un PZT.

La précision de tous ces dispositifs est limitée par la qualité de l'alignement de l'instrument ainsi que par la précision des catalogues qui fournissent les positions des étoiles. Toutefois, ce ne sont pas ces

limitations qui ont rendu ces méthodes optiques obsolètes, mais l'avènement de nouvelles méthodes au cours des années 1970 et 1980. Notons que quelques cercles méridiens modernes sont aujourd'hui en usage, mais qu'on les emploie « à l'envers » : grâce à l'heure précise fournie par des horloges atomiques, l'instant de transit permet de mesurer finement les positions stellaires dans le ciel.

### **La VLBI**

De nos jours, la méthode de mesure de la rotation terrestre la plus puissante s'appelle l'interférométrie à très grande base, ou VLBI (pour *Very Long Baseline Interferometry*). Issue de techniques développées en radioastronomie dans les années 1950, la VLBI consiste à « connecter » plusieurs radiotélescopes éloignés les uns des autres, souvent de plusieurs milliers de kilomètres, de telle sorte qu'ils effectuent leurs mesures de concert, à l'instar d'un télescope virtuel dont la taille serait la plus grande distance entre deux quelconques de ces télescopes. Nous n'allons pas détailler ici le principe de cette méthode ; l'important est de savoir que ces observatoires s'entendent à l'avance pour observer le même corps céleste au même instant, et pour enregistrer leurs observations (ainsi que des signaux horaires) sur des bandes magnétiques à haut débit. Quand on lit le contenu de ces bandes simultanément, on peut les combiner pour obtenir des images d'une précision... sidérante. De nos jours, les observations VLBI produisent des images « radio » d'une finesse bien supérieure à ce que fournissent tous les télescopes utilisant la lumière visible. Grâce à elles, on peut mesurer la position de certains des objets les plus éloignés de l'Univers – les galaxies très actives connues sous le nom de quasars – avec une précision bien meilleure que celle de n'importe quelle étoile, pourtant incroyablement plus proche. La précision de ces mesures bénéficie directement à la définition de l'UT1.

Si l'on veut utiliser la VLBI pour l'étude de la rotation terrestre, il est nécessaire d'extraire les instants précis où les signaux d'un

quasar donné arrivent à chacun des radiotélescopes des données enregistrées. La mesure des différences entre ces temps d'arrivée permet de recalculer l'orientation de la Terre par rapport au quasar au moment des observations. En effet, comme la position du quasar est connue avec précision, on peut déduire de ces différences l'orientation du réseau de radiotélescopes par rapport à la direction du quasar et, par conséquent, celle de la Terre ; cette méthode permet d'atteindre une précision supérieure à un millième de seconde d'arc<sup>17</sup>.

Les observations par VLBI d'environ 500 quasars sont aujourd'hui devenues routinières. En 1997, plus de 250 000 observations ont été obtenues à partir de 35 télescopes situés, entre autres, aux États-Unis, en Europe et au Japon.

La VLBI permet de mesurer la rotation terrestre en se référant aux objets les plus lointains de l'Univers. À moins que l'Univers entier ne tourne, cette technique permet donc une mesure de l'orientation absolue de la Terre dans l'espace, de la position du pôle comme de l'UT1.

### **Les visées laser vers la Lune**

Quand Apollo 11 se posa sur la Lune en juillet 1969, les astronautes Neil Armstrong et Edwin Aldrin laissèrent plusieurs appareillages scientifiques sur la Mer de la Tranquillité, dont une sorte de boîte plate, comportant une centaine de rétro-rélecteurs. Leur principe est semblable à celui des cataphotes situés à l'arrière des voitures, mais ce réseau-là est conçu pour renvoyer des impulsions de lumière laser vers l'observatoire qui les a émises depuis la Terre. Le but de la manœuvre est la mesure précise de la distance entre la Terre et la Lune.

La lumière parcourt l'espace à la vitesse d'environ 300 000 kilomètres par seconde. La distance de la Lune varie un peu dans le

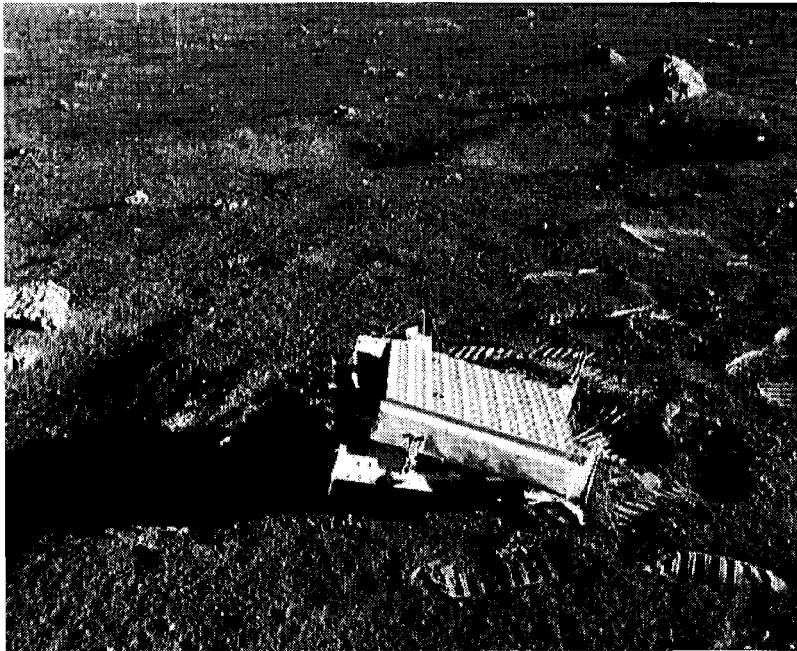
---

*17. Soit l'équivalent d'une distance de deux mètres sur la surface de la Lune, vue depuis la Terre (N.d.T.).*

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

temps, mais elle vaut en moyenne 384 000 kilomètres. Une impulsion lumineuse va donc mettre environ 1,3 seconde pour aller de la Terre à la Lune. Après réflexion sur le réseau déposé par Apollo 11, le voyage de retour prend le même temps, d'où un aller-retour en 2,6 secondes. Si l'on est capable de mesurer avec précision cet intervalle de temps entre émission et réception de l'impulsion laser, on peut en déduire immédiatement la distance du réflecteur sur la Lune.

De plus, en 1971, un réseau presque identique a été déposé par Apollo 14, près du cratère Fra Mauro (*voir la figure 39*), ainsi qu'un réseau un peu plus grand par la mission Apollo 15 au pied des



© NASA

39. Voici l'un des quatre rétro-rélecteurs laser encore en fonctionnement sur la Lune, que l'on utilise entre autres pour étudier la rotation terrestre. Celui-ci a été déposé dans le voisinage du cratère Fra Mauro par l'équipage de la mission Apollo 14 en 1971. Il comporte 100 réflecteurs, d'une taille de 3,8 centimètres chacun.

Apennins<sup>18</sup>. Des réseaux de rétro-rélecteurs équipaient aussi les jeeeps lunaires télécommandées, déposées sur la Lune par les vaisseaux soviétiques Luna 17 (Lunakhod 1, dans la Mer des Pluies, en 1970) et Luna 21 (Lunakhod 2, dans la Mer de la Sérénité, en 1973)<sup>19</sup> ; le premier des deux Lunakhod est aujourd'hui inaccessible.

Ces visées laser vers la Lune présentent des difficultés techniques incroyables. Une source de lumière ordinaire ne peut faire l'affaire car elle est trop faible ; de plus, l'étalement de son faisceau est beaucoup trop important. Même une impulsion laser particulièrement bien focalisée arrive sur la Lune sous la forme d'un faisceau de 7 kilomètres de diamètre ! La fraction de ce faisceau qui rencontre le réflecteur avant de repartir vers la Terre est infime – inférieure au milliardième. L'impulsion réfléchie depuis la Lune subit, elle aussi, un étalement notable : à l'arrivée sur la Terre, son diamètre est de 20 kilomètres. Même un télescope de bonne taille n'en récupère pas plus de deux milliardièmes. Il y a aussi d'autres pertes, ce qui fait qu'au bout du compte, on collecte au sol moins d'un photon pour 10<sup>21</sup> qui ont été envoyés vers la Lune.

Il n'est donc pas étonnant que les observatoires qui se dévouent à ces mesures laser de la distance de la Lune se comptent sur les doigts d'une seule main. Depuis le dépôt du premier réflecteur en 1969, il y a eu l'observatoire MacDonald au Texas, le centre Haleakala de suivi des satellites sur l'île de Maui à Hawaii (qui a aujourd'hui arrêté cette activité) et une station consacrée à ces mesures, à l'observatoire de Grasse, dans le sud de la France. On parle aujourd'hui de la construction d'un nouveau centre à Matera, au sud de l'Italie.

La précision de ces mesures de distance entre les observatoires terrestres et les réflecteurs lunaires s'accroît régulièrement ; elle est

---

18. Il s'agit d'une chaîne de montagnes lunaires, homonyme de celle qui traverse l'Italie du nord au sud (N.d.T.).

19. Ces deux réflecteurs laser ont été construits en France (N.d.T.).

aujourd'hui de 2 à 3 centimètres par visée. Ensuite, par des calculs complexes faisant intervenir les attractions terrestre, solaire et des diverses planètes, on en déduit une masse énorme d'information sur le mouvement de la Terre comme sur celui de la Lune. On a prouvé par exemple que la Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 centimètres par an. Ces visées laser vers la Lune contribuent aujourd'hui à la mesure d'UT0 – le Temps Universel de chacun des observatoires concernés – à raison d'environ 100 mesures par an.

### **Les visées laser vers des satellites**

Les mesures de distance de satellites par visées laser fonctionnent sur le même principe que les visées vers la Lune, mais elles demandent des performances moins extrêmes. Il s'agit ici de récupérer des impulsions laser envoyées vers des satellites artificiels en orbite terrestre, équipés eux aussi de réflecteurs laser. Les deux principaux satellites utilisés sont les deux Lageos (*Laser Geodynamics Satellite*, satellite de géodynamique par laser) ; ils ont été mis en orbite en 1976 et en 1992. Les visées laser sont l'unique utilisation de ces satellites ; ils comportent un cœur de cuivre, entouré d'une coquille en aluminium de 60 centimètres de diamètre, elle-même recouverte de 426 réflecteurs. Chaque satellite a une masse supérieure à 400 kilogrammes.

Leur orbite se situe à 5 900 kilomètres du sol, suffisamment haut pour qu'ils ne soient pas affectés par le frottement de l'air résiduel de la haute atmosphère, et aussi pour que l'on puisse les voir de tout endroit du Globe. Plus de 30 stations suivent ces deux satellites, et mesurent leur distance à mieux que 2 centimètres.

Ces satellites tournent autour du centre de gravité de la Terre. Dans le même temps, la Terre est en rotation, ce qui fait que ces nombreuses mesures précises de la position des satellites – environ 9 000 par an – permettent aussi de mesurer la rotation terrestre. Leur intérêt principal réside dans la mesure journalière du déplacement des pôles, mais on les utilise aussi pour des mesures d'UT1 sur de courtes échelles de temps.

### **Le GPS**

Le système de positionnement global de l'armée américaine (le GPS) a révolutionné la mesure du temps à bien des égards. Au chapitre 4, nous avons vu comment cette « constellation » de 24 satellites est utilisée pour transférer des informations temporelles entre les différents centres nationaux et le BIPM ; nous y reviendrons au chapitre suivant. On l'utilise également pour suivre la rotation terrestre. À chaque instant, au moins cinq satellites sont visibles depuis un point donné du Globe ; ce nombre peut aller jusqu'à huit, voire dix en certains endroits. En analysant les signaux temporels diffusés par les satellites, on déduit la position d'un récepteur au sol avec une grande précision. Grâce au suivi en continu de ces satellites par un réseau de 30 stations, l'IERS mesure l'UT1 avec une précision à court terme de 60 microsecondes, et fournit des estimations journalières du mouvement des pôles.

### **DORIS**

La dernière en date des techniques de suivi de la rotation terrestre se nomme DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégré par Satellite). DORIS s'appuie sur un réseau mondial de 50 balises radio dont les signaux peuvent être reçus par un satellite équipé du matériel adéquat. À ce jour, seuls les satellites SPOT (français) et Topex-Poséidon (franco-américain) sont équipés de récepteurs DORIS, mais d'autres devraient suivre sous peu. Le satellite mesure la fréquence d'ondes radio reçues d'une à deux balises en visibilité directe. La fréquence des ondes est modifiée par effet Doppler à cause de la vitesse du satellite ; un ordinateur embarqué calcule la vitesse du satellite par rapport aux balises, ce qui permet de déduire l'orbite du satellite avec précision. Conçu à l'origine pour la mesure fine de l'altitude des satellites afin d'en déduire la hauteur des océans, DORIS a depuis été utilisé à d'autres fins géophysiques. Comme dans le cas du GPS ou des visées laser, on en tire évidemment de l'information sur la rotation terrestre.



### **Les variations de la rotation terrestre**

La rotation terrestre varie au cours des années, ce qui se manifeste par des changements de la durée de la journée. Avant d'en discuter la raison, examinons l'importance de ces variations. La figure 40 représente la durée moyenne de la journée, pour chaque année à compter de 1700, ou plus précisément l'écart de cette durée à la durée « normale » de 86 400 secondes SI, soit exactement 24 heures. Les valeurs représentées dans cette figure viennent de plusieurs sources : jusqu'en 1960, elles sont exclusivement issues de mesures astronomiques de transit d'étoiles ; depuis lors, les autres méthodes que nous venons de décrire sont utilisées. Comme ce sont des moyennes sur une année, on ne peut y détecter les variations saisonnières que nous aborderons plus loin. En revanche, les variations à moyen et long termes au cours des trois derniers siècles apparaissent clairement. Ce qui est frappant dans cette courbe, c'est qu'on n'y discerne aucune régularité. Nous savons pourtant que la Terre ralentit lentement sa rotation à cause des effets de marée de la Lune et du Soleil : eh bien, cela ne se voit pas sur la durée de ce diagramme. Les variations de la durée du jour semblent aléatoires. La seule affirmation quantitative que l'on puisse faire est la suivante : il existe des variations à l'échelle de plusieurs décennies affectant la durée moyenne du jour à hauteur de 4 millisecondes au maximum.

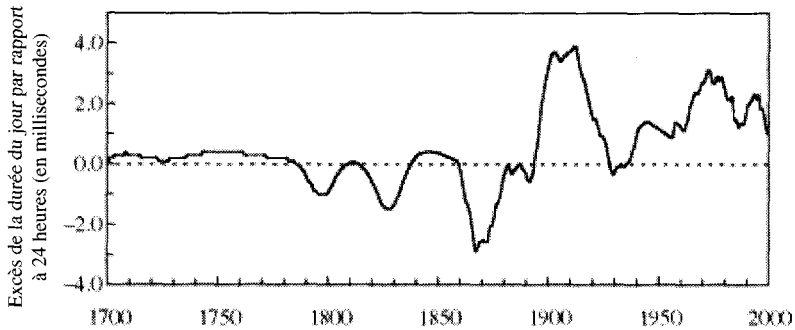
Tout au long des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, la longueur du jour est restée proche de 86 400 secondes – à la possible exception de la fin de cette période – et il ne faut pas s'en étonner : la seconde de Temps des Éphémérides a *justement* été définie en se basant sur la durée moyenne d'une seconde de temps solaire moyen au cours de cette même période ; par la suite, la seconde atomique du Système International fut choisie pour s'approcher au plus près de cette seconde de temps TE.

### **Pourquoi la rotation terrestre varie**

Au chapitre 1, nous avons suivi les efforts acharnés d'Edmond Halley pour expliquer les désaccords entre les mesures de la position

de la Lune effectuées à son époque, et plusieurs siècles auparavant. On comprit finalement que cela était dû aux forces de marée exercées par la Lune et le Soleil, qui font perdre à la Terre un peu de sa vitesse de rotation, et donc de son énergie. Le monde tournait plus vite par le passé, et le jour était donc plus court.

Selon les meilleures estimations actuelles, l'accroissement de la durée du jour par effet de marée atteint 2,3 millisecondes par siècle, depuis au moins 2 700 ans. Des recherches historiques menées par Richard Stephenson, de l'université de Durham, et Leslie Morrison, de l'observatoire royal de Greenwich, ont montré que ces effets de marée sont insuffisants pour rendre compte des variations observées sur cette période. En étudiant les textes historiques sur les éclipses – les plus anciens remontent à 700 ans avant notre ère – ils ont constaté qu'au moins deux autres effets sont à l'œuvre.



40. Les relevés écrits d'observations astronomiques anciennes permettent aux astronomes d'aujourd'hui de recalculer la durée du jour solaire moyen au cours des trois siècles passés – et donc aussi les variations de cette durée. On observe un accroissement brutal, mais de courte durée, de la durée moyenne du jour vers la fin des années 1950 ; cela correspond exactement au ralentissement de la rotation terrestre observé sur une période de trois ans dans la figure 22.

20. De même qu'un patineur tourne plus vite sur lui-même quand il rapproche ses bras du corps (N.d.T.).

L'un de ces effets tend à *raccourcir* la durée de la journée d'environ 0,6 milliseconde par siècle. Il reste assez mystérieux ; une explication possible résiderait dans des variations de la forme de la Terre depuis la fin de la précédente période glaciaire voici 10 000 ans. Il est possible que, lors de la retraite des glaciers vers les pôles, les terrains ainsi libérés du poids de la glace soient « remontés ». Cet effet – connu sous le nom de « rebond post-glaciaire » – aurait rendu la forme de la Terre plus proche d'une sphère. Son bourrelet équatorial serait aplati, si bien que la vitesse de rotation aurait augmenté<sup>20</sup>.

Le second effet est plus mystérieux encore. La rotation de la Terre semble accélérer puis ralentir avec une période d'environ 1 500 ans, avec une amplitude de 4 millisecondes dans chaque sens. Parmi les idées avancées pour expliquer cet effet, on évoque des mouvements au sein du noyau terrestre (voir la prochaine section) ou bien des variations du niveau des océans.

Considérés ensemble, ces trois effets résultent en un accroissement moyen de 1,7 milliseconde par siècle. Le moins que l'on puisse dire, c'est que cet effet ne saute pas aux yeux dans la figure 40. Cela ne veut pas dire qu'il y soit absent : les fluctuations plus importantes, et de plus courte durée, le masquent probablement. À très long terme, il est indiscutable que les forces de marée ralentissent la rotation terrestre ; simplement, pour notre préoccupation de mesureurs du temps sur le court terme, leur effet est presque négligeable.

### **Les variations aléatoires**

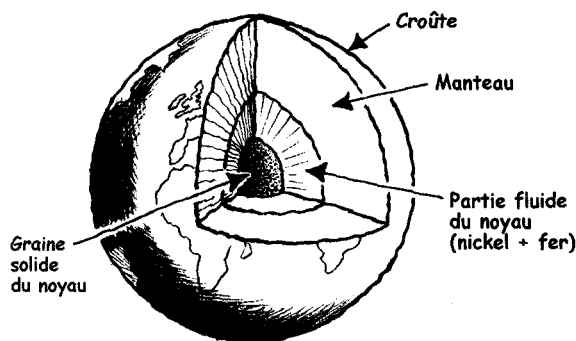
Les variations les plus évidentes se produisent à l'échelle de quelques décennies : elles sont le cauchemar des « gardiens de l'heure ». Reportez-vous un instant à la figure 22 page 71, qui montre la variation de la seconde UT entre 1955 et 1958, époque où le NPL et l'USNO étaient en train d'étalonner la seconde atomique. Vous y verrez une variation quasi-linéaire, qui correspond en fait à un épisode bref et atypique, au cours duquel le ralentissement est

## LES SECONDES INTERCALAIRES

anormalement rapide. En effet, peu de temps après, la rotation s'est accélérée avant de s'engager dans une nouvelle période de ralentissement qui dura jusqu'au milieu des années 1970. Dans les années 1990, la rotation s'accélérait à nouveau et, à la mi-1999, la durée du jour reprit – brièvement – la valeur « exacte » de 86 400 secondes.

Les observations antérieures à 1800 sont plus incertaines, mais comment faut-il interpréter le profond creux du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, ou bien l'« énorme » pic du début du XX<sup>e</sup> ?

Aujourd'hui, l'idée dominante est que ces fluctuations trouvent leur origine au plus profond de la Terre, à la limite entre le noyau et le manteau (voir la figure 41). Le noyau est composé de fer et de nickel. Aux conditions de températures et de pression qui règnent à ces profondeurs, la partie externe de ce noyau est fondue, ou tout du moins plastique, c'est-à-dire que ces métaux peuvent s'écouler ; on pense d'ailleurs que ces écoulements sont la source du champ magnétique terrestre. Ce champ est donc un outil indiquant ce qui se passe au cœur de la Terre : les géophysiciens étudient à cette fin les petites variations temporelles du champ magnétique.



41. Il est possible que de lents déplacements de matière dans la partie fluide du noyau terrestre provoquent, au contact du manteau solide, de lentes et irrégulières variations de la durée du jour.

On peut en déduire que les écoulements sont extrêmement lents, moins d'un millimètre par seconde, et irréguliers ; les champs magnétiques qu'ils engendrent exercent des forces sur le manteau solide qui influent peut-être sur la rotation terrestre, la ralentissant ou l'accéléralant suivant la configuration. Certains scientifiques ont aussi fait l'hypothèse de « montagnes inversées » à la base du manteau, que les écoulements de métal fluide du noyau pourraient « pousser ». S'il se confirme que ces écoulements sont vraiment la cause des fluctuations de la rotation terrestre, personne ne sait en revanche comment prédire ces dernières.

### **Des variations saisonnières**

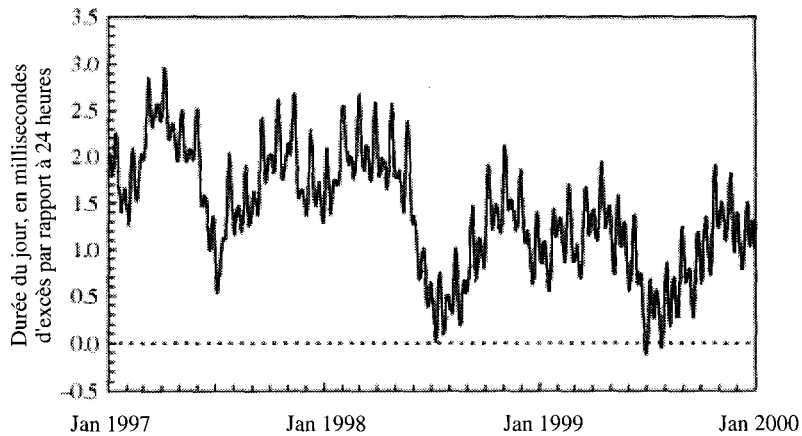
Comme nous l'avons vu au chapitre 1, des fluctuations saisonnières de la durée du jour ont été découvertes dans les années 1930 : elles portèrent un coup sévère à l'idée d'une échelle de temps basée sur le jour solaire moyen. La figure 40 ne fait pas apparaître ces fluctuations saisonnières, car ce sont les moyennes annuelles de la durée du jour qui y sont représentées. Mais la figure 42 montre les fluctuations journalières de cette durée du jour pour les trois années 1997 à 1999. Il s'agit d'un zoom sur l'extrémité droite de la figure 40, où l'on voit la durée du jour se raccourcir régulièrement.

Cette accéléralation de la rotation apparaît comme une tendance générale sur cette figure, mais ce qui frappe le plus, ce sont les variations saisonnières au sein de chaque année. L'amplitude de ces variations saisonnières est comparable à celle des variations sur une plus grande échelle de temps, mais elles sont plus rapides. Au cours d'une année, deux pics sont observés : la Terre tourne plus lentement au printemps et en automne, et elle accélère nettement en été. Une accéléralation moindre apparaît aussi aux alentours du début de l'année.

Il est désormais établi que ces variations sont dues à des changements planétaires de la circulation atmosphérique au cours d'une année. Quand la météo varie d'une saison à l'autre, la direction et

la force des vents changent. Des vents soufflant contre des montagnes sont tout à fait capables de changer la rotation terrestre d'une quantité mesurable. On observe sur la figure 42 des fluctuations sur une échelle de 30 à 60 jours, qui sont, elles aussi, fort bien expliquées par l'influence du vent. Aujourd'hui, on peut mesurer le moment cinétique de l'atmosphère : ces mesures s'accordent bien avec les variations saisonnières observées.

Il est probable que les courants océaniques jouent aussi un rôle, moins important car ils varient dans une moindre mesure et beaucoup moins vite que les « courants d'air ». En 1983, un événement intéressant s'est produit : la durée du jour augmenta assez brutalement d'une milliseconde durant plusieurs semaines. Cela coïncidait avec le phénomène dit El Niño, au cours duquel les courants océaniques du Pacifique oriental changent de sens, en même temps



42. Les mesures journalières de la durée du jour, au cours de la période 1997-1999. Une accélération de la rotation est visible, ainsi que les variations saisonnières au cours de chaque année. Les fluctuations plus rapides s'expliquent naturellement par la déformation de la Terre par les forces de marée terrestre dues à la Lune et au Soleil. La durée du jour est – brièvement – descendue sous les 86 400 secondes à deux reprises, en juin et juillet 1999.

que des situations inhabituelles de pression atmosphérique sont observées.

La figure 42 montre aussi des variations plus rapides et relativement plus régulières, avec des périodes de deux et de quatre semaines. Elles sont dues aux marées soulevées dans la croûte terrestre par la Lune et le Soleil. Comme ces marées déforment la Terre, cela affecte sa période de rotation.

### **La seconde intercalaire**

Nous venons de discuter les variations de la durée du jour. Il faut bien avouer que ces variations semblent petites, ne s'écartant pas de plus de 4 millisecondes de la valeur canonique de 24 heures sur les trois siècles écoulés. Une milliseconde, ça n'est pas bien long ! En une milliseconde, un point situé à l'équateur terrestre ne se déplace que de 50 centimètres, ce qui nous amène à penser que les conséquences pratiques sur la mesure du temps, et donc sur la connaissance de l'heure qu'il est, sont négligeables. Mais il n'en est rien.

Imaginons une situation simplifiée où le jour a une durée fixe, mais plus longue d'une seule milliseconde que les fameuses 24 heures. Supposons aussi que nous vérifions chaque jour le temps « de la Terre » – UT1 – par rapport à une horloge atomique qui égrène ses secondes SI. Au bout d'un jour, UT1 retardera d'une milliseconde. Le jour suivant, de 2 millisecondes. Au bout d'un an, l'écart atteindra 365 millisecondes, et la différence deviendra bien visible. Dix ans plus tard, l'« horloge Terre » retardera de 3,65 secondes sur l'horloge atomique.

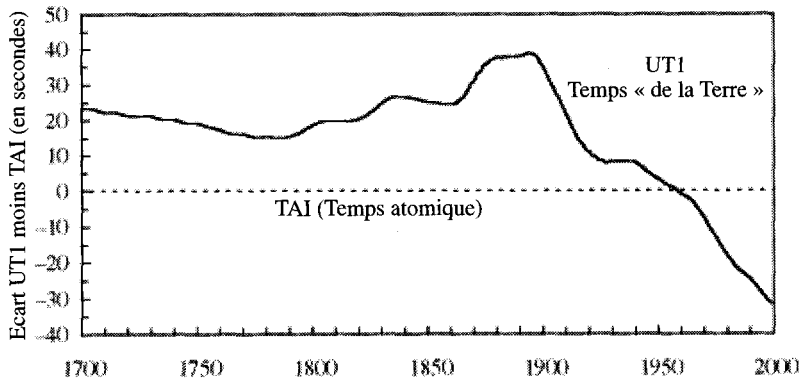
La figure 43 présente cet écart cumulé entre UT1 et TAI depuis 300 ans. Bien sûr, vous pourriez objecter que le temps atomique n'existe que depuis 1955 (et on ne l'appelle TAI qu'*a posteriori*) ; mais en fait, on suit cette différence dans le passé grâce aux Temps des Éphémérides.

Cette figure résume à elle seule le problème du temps atomique. Une horloge parfaite qui compterait des secondes SI et qui

## LES SECONDES INTERCALAIRES

aurait été ajustée sur le TAI en 1958 aurait présenté un écart supérieur à 15 secondes avec le temps UT1 sur la durée du XVIII<sup>e</sup> siècle, et de 20 à 40 secondes au cours du XIX<sup>e</sup>. En revanche, au XX<sup>e</sup> siècle, elle aurait foncé de 35 secondes de retard en 1900 jusqu'à avoir 30 secondes d'avance en 2000. Il ne faut pas s'étonner que les astronomes aient finalement abandonné la mesure du temps basée sur la rotation terrestre ! Nous voyons aussi que le seul TAI ne peut suffire à fournir une bonne échelle de temps, et pourquoi, dans les années 1960, il était si difficile de réconcilier le TAI et l'UT1.

La solution, entrée en application en 1972, consiste à insérer une seconde intercalaire dans l'UTC pour qu'il ne s'écarte jamais de plus de 0,9 seconde de l'UT1. C'est l'IERS qui est chargé de « tirer la sonnette d'alarme » et d'annoncer plusieurs mois à l'avance la nécessité de recourir à une seconde intercalaire. Une seconde intercalaire peut être positive (auquel cas il y aura une minute qui comptera 61 secondes) ou négative (dans ce cas, la minute exceptionnelle comptera 59 secondes) ; à ce jour, toutes les secondes intercalaires introduites ont été positives. Les règlements adoptés autorisent



43. Les variations de la durée du jour provoquent des écarts entre UT1 (l'heure de la Terre en rotation) et le temps atomique TAI, qui s'écoule imperturbablement. Les astronomes sont obligés de tenir compte de ces écarts quand ils se reportent à des observations anciennes.



l'introduction d'une seconde intercalaire comme dernière seconde d'un mois quelconque du calendrier ; il est néanmoins préférable de se restreindre aux mois de décembre et juin, et cette recommandation a toujours été suivie jusqu'à présent. Si vous voulez voir à quoi ressemble une seconde intercalaire, reportez-vous à la figure 44 qui en montre une, surprise sur une horloge atomique du NPL dans les derniers instants de décembre 1998.

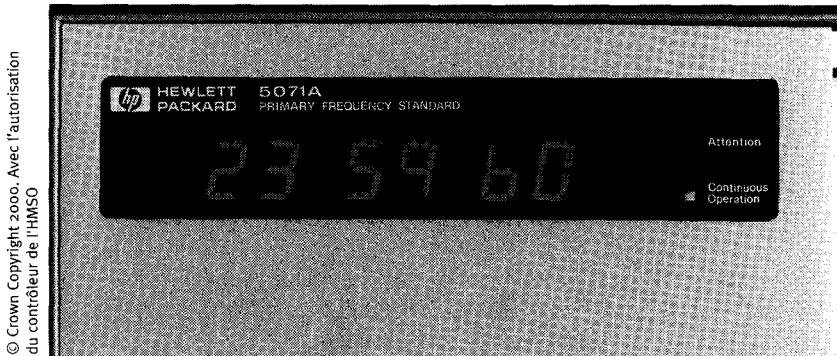
La figure 45 présente, tout comme la figure 43, l'écart entre UT1 et TAI, mais en agrandissant la période récente, et en montrant en plus le temps UTC depuis 1972. Les secondes intercalaires y sont bien visibles comme des sortes de « marches d'escalier » ; il en faut pratiquement une par an pour maintenir UTC suffisamment proche d'UT1.

Quand la version moderne de l'UTC fut introduite en 1972, le BIH, alors responsable de ces questions, fut chargé de maintenir l'UTC à moins de 0,7 seconde d'UT1, ce qui ne s'annonçait pas comme une mince affaire. L'année 1972 débuta avec un ajustement initial « pour remettre les pendules à l'heure », d'un peu plus de 0,1 seconde, afin de régler l'UTC sur un retard d'exactly 10 secondes derrière le TAI. Après cela, l'UTC se trouvait en avance de 45 millisecondes sur l'UT1. À l'été 1972, UT1 se retrouvait déjà 0,6 seconde derrière UTC ; il fallut donc introduire la première seconde intercalaire à la fin de juin 1972. À la fin de l'année, UT1 avait à nouveau pris du retard, et l'on pensait que cela nécessiterait une deuxième seconde intercalaire ; mais celle-ci aurait amené l'UT1 à être en avance de 0,81 seconde sur l'UTC, ce qui dépassait la limite autorisée de 0,7 seconde ! Quand les règles risquent d'être violées, on peut faire particulièrement attention à les respecter, ou bien les assouplir un peu : la seconde solution prévalut finalement en 1974, avec un assouplissement de l'écart maximal de 0,7 à 0,9 seconde. Depuis lors, UTC ne s'est jamais écarté de plus de 0,78 seconde d'UT1 ; cela se produisit en juin 1994.

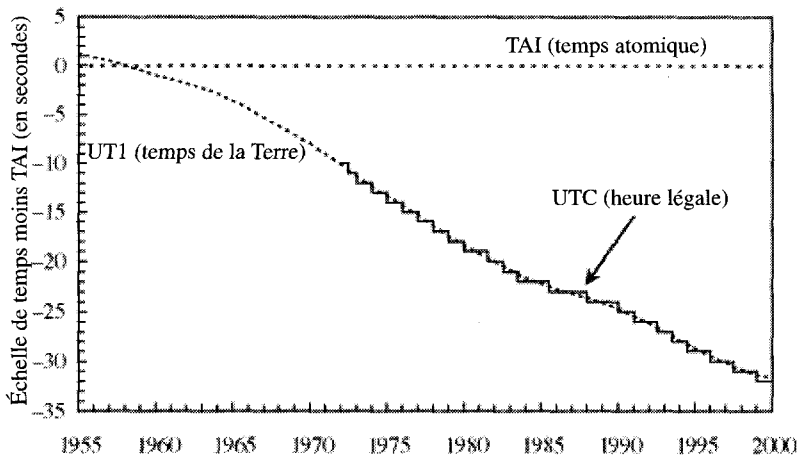
LIERS publie les résultats de son suivi permanent de la rotation terrestre dans un bulletin, le Bulletin A, un rapport bi-hebdomadaire

## LES SECONDES INTERCALAIRES

aussi compréhensible pour le commun des mortels que la Circulaire T du BIPM. Si vous tenez absolument à voir à quoi il ressemble, n'hésitez pas à le télécharger depuis son site web (vous trouverez l'adresse dans l'appendice, à la fin de l'ouvrage). Chaque



44. Voici la dernière seconde de la dernière minute de l'année 1998 ; cette minute comportait 61 secondes. La seconde intercalaire a été prise en flagrant délit sur cette horloge atomique du NPL au Royaume-Uni.



45. Cet agrandissement de l'extrémité droite de la figure 43 montre comment on a maintenu, à partir de 1972, l'UTC à moins de 0,9 secondes de l'UT1 par l'insertion de secondes intercalaires.

Bulletin A contient les résultats préliminaires des quelques jours précédents, plus précisément la position du pôle et la différence entre UT1 et UTC, calculée à l'aide des méthodes que nous avons décrites plus haut dans ce chapitre. De nos jours, les valeurs quotidiennes de la différence UT1–UTC ainsi que la durée moyenne du jour sont mesurées avec une précision de quelques microsecondes. Le Bulletin A contient aussi des prévisions de UT1–UTC pour l'année à venir ; bien évidemment, plus on se projette dans le futur, plus grande est l'incertitude sur la prévision. Au moment où ces lignes sont écrites (printemps 2000), le Bulletin A montre que l'écart entre UT1 et UTC s'est presque stabilisé, si bien qu'UTC va garder une avance confortable sur UT1 jusqu'à la fin 2000 ; on ne prévoit donc pas de nouvelle seconde intercalaire avant 2001<sup>21</sup>.

Chaque mois, l'IERS livre les résultats finaux des deux mois précédents, dans son Bulletin B ; celui-ci contient aussi une liste de quantités déduites de ces calculs, et ce séparément, technique par technique, pour toutes celles qui ont été utilisées au cours de cette période. Quand l'IERS décide qu'une seconde intercalaire est nécessaire, il l'annonce quelques mois à l'avance dans un bulletin dit Bulletin C<sup>22</sup>.

### **De combien de secondes intercalaires avons-nous vraiment besoin ?**

On entend souvent dire que les secondes intercalaires sont nécessaires à cause du ralentissement de la rotation terrestre. Une lecture un peu rapide de ce chapitre, ou de tout autre texte sur le même sujet, peut en effet conduire à la conclusion que la Terre ralentit, et que les secondes intercalaires servent à recoller l'heure

---

21. Au moment où ces lignes sont imprimées (printemps 2003), aucune nouvelle seconde intercalaire n'a été introduite et aucune ne sera nécessaire d'ici décembre 2003. (N.d.T.).

22. Le Bulletin C est édité en ce moment tous les six mois, même si aucune seconde intercalaire ne s'avère nécessaire à la fin de la période de six mois en cours. Il sert à prévenir les divers centres mondiaux bien à l'avance de la décision de l'IERS (N.d.T.).

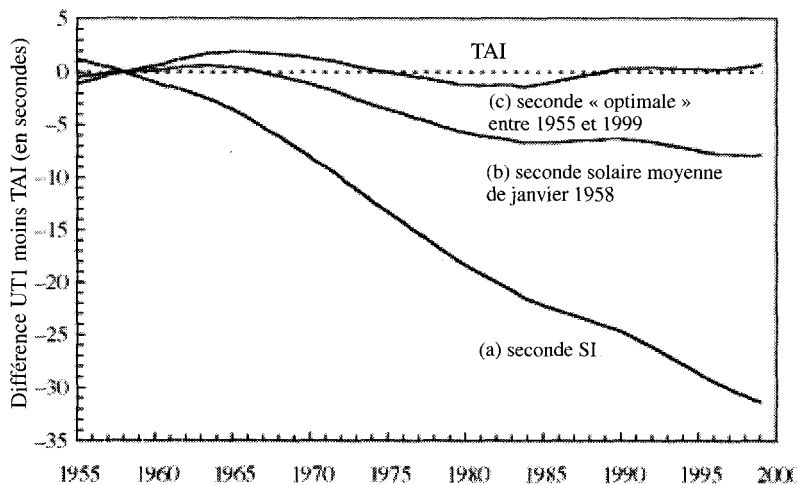
des horloges avec la rotation terrestre. Cette interprétation est fautive. Pendant la plus grande partie des années 1990, la rotation de la Terre s'est *accélérée* (tout au moins d'une année sur l'autre) ; si bien qu'aujourd'hui, elle est plus rapide qu'à n'importe quel moment des 60 années passées. Pourtant, au cours des 30 dernières années, nous avons dû introduire 22 secondes intercalaires, *toutes positives*. Alors, l'un dans l'autre, avons-nous vraiment besoin de ces secondes supplémentaires ?

Vous vous souvenez peut-être qu'au début du chapitre 4, nous nous sommes lamentés sur la difficulté de construire deux horloges identiques. Quel que soit le soin apporté, la pulsation de deux horloges différentes sera toujours différente et, si l'on « donne du temps au temps », leurs affichages vont finir par diverger notablement. La raison ultime de nos secondes additionnelles n'est pas à chercher ailleurs : si UT1 et TAI divergent, c'est parce qu'ils battent à des rythmes différents. UT1 bat plus lentement : la seconde solaire moyenne d'UT1 depuis 1955 est plus longue que la seconde SI atomique, celle du TAI. Cela était inévitable, puisque la seconde atomique a été soigneusement choisie afin de correspondre à la seconde de Temps des Éphémérides, elle-même définie à partir de la durée de la seconde solaire moyenne aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles. Si l'on avait choisi une autre définition de la seconde SI, on aurait pu s'arranger pour que la divergence entre UT1 et TAI soit considérablement réduite.

Imaginons par exemple que cette seconde SI, celle qui est définie par rapport à la transition du césium, ait été choisie égale à la seconde solaire moyenne du 1<sup>er</sup> janvier 1958, le jour où le TAI a été ajusté sur l'UT1. Dans ce cas, elle aurait été définie égale à 9 192 631 937 périodes de la transition hyperfine du césium (contre 9 192 631 770 dans la définition retenue) ; vous pouvez déduire vous-même la première de ces valeurs de l'extrémité droite de la figure 23. La différence n'est pas énorme, me direz-vous – moins de deux parties pour 100 millions – alors en quoi notre mesure de l'heure en aurait-elle été affectée ?

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

La figure 46 contient la réponse : cette « redéfinition » de la seconde aurait fait que l'UT1 ne serait aujourd'hui en retard que de 8 secondes sur le TAI (contre près de 32 avec la vraie définition) ; et depuis 1972, nous n'aurions eu besoin que de 6 secondes intercalaires, contre 22 dans la réalité. Cette différence, importante malgré tout, n'est due qu'à notre « redéfinition » de la seconde SI plus proche de celle du Temps Universel UT, que de celle du Temps des Éphémérides TE. En fait, et malheureusement, cette dernière option n'était tout simplement plus disponible en 1958. Le train



46. Le TAI était, par définition, égal à l'UT1 au début de l'année 1958, le 1<sup>er</sup> janvier. Depuis lors, les deux échelles ont divergé parce que la seconde SI (courbe a) est légèrement plus longue que la seconde UT1. Si la seconde SI avait été prise égale à la seconde UT1 au même moment, la divergence aurait été moins grande (courbe b). En considérant, grâce au recul du temps, toutes les mesures depuis 1955, on est même capable de définir une sorte de seconde « optimale » (courbe c), telle que l'UT1 et le TAI n'auraient jamais différencié de plus de 2 secondes sur cette période. La nécessité d'introduire des secondes intercalaires relativement fréquentes dans l'UTC n'est pas due à des variations de la rotation terrestre : elle est tout simplement due au choix de la définition de la seconde SI dans les années 1960.

infernale du temps TE était déjà lancé, et la CGPM s'était déjà engagée à définir la seconde SI par rapport au Temps des Éphémérides.

Notre « re-définition » proposée ci-dessus n'est pas encore la meilleure. Après tout, nous avons maintenant plus de recul, près d'un demi-siècle depuis 1955. Selon nos mesures de la rotation terrestre depuis ce temps, quel pourrait bien être une définition de la seconde SI qui aurait minimisé sur cette période les écarts entre TAI et UT1 ? La réponse est 9 192 631 997 fois la période de la transition du césium. Avec une telle définition, l'écart n'aurait jamais dépassé 2 secondes – parfois en avance et parfois en retard – et il n'aurait fallu que 3 secondes intercalaires depuis 1972, 2 négatives et 1 positive. D'ailleurs, avec les taux d'avancement du TAI et de l'UT1 si bien ajustés, ces secondes auraient réellement reflété des variations de la durée du jour.

L'histoire ne s'arrête pas là, bien entendu. On ne peut pas satisfaire à la fois le monde entier et ses parents. L'apparente amélioration apportée par cette proximité renforcée du TAI et de l'UT1 aurait semé un désordre incroyable dans l'histoire de l'astronomie. La figure 43 nous montre en effet qu'en 1700, UT1 avait 23 secondes d'avance sur le TAI. Avec notre modeste proposition de redéfinition de la seconde de 1958, cet écart serait passé à 123 secondes de retard, alors qu'avec notre seconde (plus tellement) « optimale », ce retard serait passé à 178 secondes, près de 3 minutes. Tout bien considéré, laissons donc le temps comme il est... pour le moment.



# 6

## Le partage du temps

Toutes ces arguties sur la définition du temps – que ce soit par rapport à la rotation de la Terre, la durée de l'année ou bien les oscillations de l'atome de césium – semblent parfois bien éloignées de la vie quotidienne. Si vous ou moi voulons savoir l'heure qu'il est, il nous arrive assez rarement de suivre le transit d'étoiles au travers d'un télescope, ou de photographier la Lune durant plusieurs années pour en déduire ce que valait le Temps des Éphémérides au début de notre travail, et encore moins de calculer une moyenne pondérée de 200 horloges atomiques réparties sur la planète. Nous regardons plutôt une horloge.

### Où trouver l'heure ?

Que ce soit une montre-bracelet, une horloge électrique, voire une horloge de grand-papa, nous lui faisons confiance pour deux raisons principales. La première est que nous connaissons son comportement passé et que nous savons que son affichage a été fiable. Avec les horloges à quartz modernes, nous ne ressentons même pas le besoin de nous en assurer : il est évident qu'elle n'avancera pas ni ne retardera. Qu'est-ce qui nous donne cette assurance, et pourquoi l'horloge est-elle « à la hauteur » ? Tout bonnement parce qu'elle a été comparée, par le constructeur ou par nous-même, à une horloge de qualité supérieure dont on sait qu'elle avance au « bon » rythme.



Cela nous amène à la seconde raison de notre confiance. Chacune de ces horloges a été un jour *réglée* pour donner l'heure exacte, par rapport à une autre horloge plus fiable. Si l'heure y a été réglée la semaine dernière, et si notre horloge est de bonne qualité, il n'y a pas de raison de douter de l'heure qu'elle affiche aujourd'hui.

Il existe donc une hiérarchie des horloges : je règle la mienne sur la vôtre, qui est meilleure ; vous réglez la vôtre sur une troisième horloge encore meilleure, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on atteigne le Temps Universel UTC diffusé par le Bureau International des Poids et Mesures. Dans ce chapitre, nous allons nous attarder sur la *diffusion* de l'heure -- comment elle est transférée d'un endroit à l'autre, et comment chacun d'entre nous accède à une version du temps UTC éloignée d'à peine un ou deux maillons de sa source parisienne.

Il existe de nombreuses façons d'obtenir une heure précise, mais toutes reposent sur l'un ou l'autre des trois principes suivants, que nous détaillerons avant de décrire les moyens disponibles pour accéder à une heure extraordinairement précise.

### **Le transfert « à sens unique »**

C'est de loin la méthode la plus usuelle. Dans sa version la plus simple, je règle ma montre en regardant la pendule de la cuisine. Résumons : je regarde la pendule de la cuisine, puis je regarde ma montre et je règle ses aiguilles jusqu'à ce que l'heure qu'elle donne coïncide avec celle de la pendule. Je viens de réaliser un transfert de temps « à sens unique » de la pendule vers ma montre. Imaginons maintenant que je n'ai pas de pendule dans ma cuisine et que je dois régler ma montre sur une horloge située dans un village voisin, mais hors de ma vue. La situation se complique. Comment vais-je faire pour savoir quelle heure indique cette horloge éloignée ? Quand enfin je le saurai, comment tenir compte du délai nécessaire au transfert de cette information temporelle ?

Anne habite un village isolé, où la seule source à peu près fiable de l'heure est le clocher de l'église. L'horloge sonne toutes les

heures, ce qui permet à Anne et à ses concitoyens de régler leurs montres en guettant ces sons de cloche horaires. Voilà un exemple de transfert à sens unique, qui marche bien si on n'a pas besoin d'une heure particulièrement précise.

Cependant, Anne sent bien que ce n'est pas suffisant. Sans parler de la justesse peut-être discutable de l'horloge du clocher, il est indéniable que les villageois les plus éloignés du clocher entendront l'horloge sonner quelques secondes après ses voisins immédiats. Elle décide donc de s'acheter sa propre horloge, bien meilleure que celle de l'église. La rumeur se répand vite : il existe au village une nouvelle horloge bien plus précise, et les voisins d'Anne se succèdent chez elle pour lui demander s'ils ne pourraient pas par hasard régler leur horloge sur la sienne.

Anne se dit finalement qu'elle ferait mieux de diffuser ses propres signaux horaires. Elle installe un canon sur son toit, le relie à son horloge et tire chaque jour, à midi précises, un coup de canon à l'adresse de tous les habitants du village. Les villageois peuvent alors régler leurs horloges sur le canon d'Anne plutôt que sur la cloche de l'église.

Bill habite à l'autre bout du village ; il est fort impressionné par le système mis en place par Anne. Il se rend toutefois compte que, pour profiter au mieux de cette nouvelle possibilité, il lui faut tenir compte du temps nécessaire au son du canon pour lui parvenir. Le son ne voyage pas instantanément dans l'air : il lui faut plusieurs secondes pour arriver chez Bill. À partir de la distance entre les deux maisons, il estime ce temps de transit sachant que le son se propage à environ 330 mètres par seconde ; il en déduit la correction à appliquer à son horloge. Si par exemple la maison d'Anne est à 3 kilomètres, le son mettra 9 secondes à lui parvenir et, quand Bill entendra le canon d'Anne, il devra régler son horloge sur 12:00:09. S'il est persévérant et qu'il effectue cet étalonnage quotidiennement durant plusieurs jours, il pourra même comparer les battements de l'horloge d'Anne et de la sienne ; de plus si son horloge

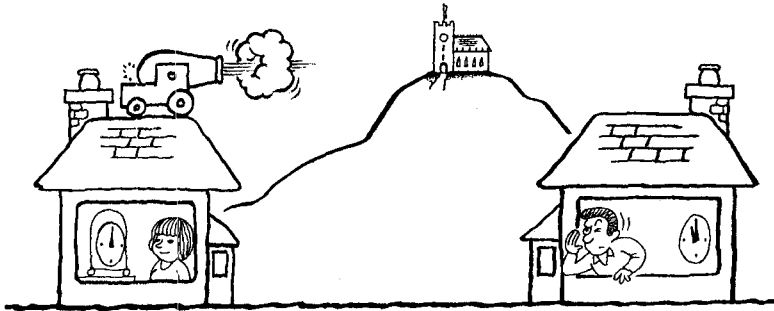
est équipée d'un réglage du taux d'avancement, alors il pourra l'ajuster sur celui de l'horloge d'Anne, réputée supérieure (voir la figure 47).

Bientôt, d'autres personnes imitent Bill : ils mesurent leur distance à la maison d'Anne et adoptent la même procédure. Ainsi, par transfert de temps à sens unique, on peut diffuser le temps à une large audience.

Le point faible de la méthode est la correction effectuée, le temps de transfert entre « chez Anne » et « chez Bill ». En effet, la vitesse du son n'est pas constante ; elle varie avec la température et avec l'humidité de l'air, qui changent d'un jour à l'autre. Cela inquiète Bill, qui est assez pincailleur. Comment s'assurer que la correction est bien faite et qu'il bénéficie de toute la précision offerte par l'horloge d'Anne ?

### **Le transfert de temps par aller-retour**

Bill pense qu'il est indispensable de mesurer le temps de transfert chaque jour, juste avant l'émission du signal horaire d'Anne. Il installe sur son toit un immense réflecteur, et persuade Anne d'envoyer un « coup de semonce » peu avant son signal horaire et de noter le temps d'aller-retour du signal sonore. Si elle trouve



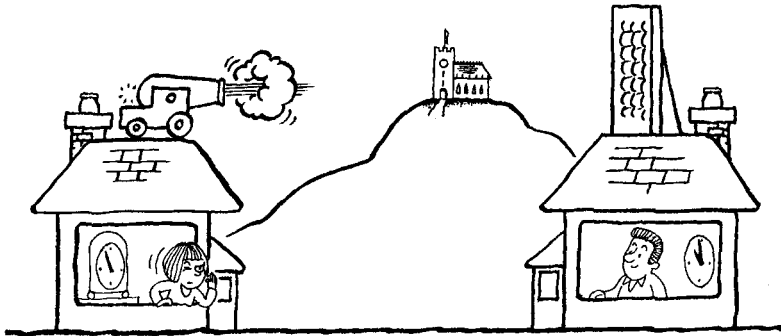
47. Le transfert de temps à sens unique. L'horloge précise d'Anne déclenche un coup de canon chaque jour à midi. Bill règle sa montre d'après ce coup de canon, mais il lui faut tenir compte du temps mis par le son pour lui parvenir.

18 secondes, elle en déduit sans peine que le son met 9 secondes pour se propager de son canon vers la maison de Bill. Elle s'arrange alors pour émettre son « top horaire » 9 secondes avant midi. Donc, Bill entend le canon tonner à midi précise, et règle son horloge en conséquence (voir la figure 48).

Il n'y a qu'un défaut : la méthode ne marche que pour Bill. Les autres villageois qui voudraient profiter de l'aubaine doivent maintenant installer leur propre réflecteur sonore, et passer chacun un accord bilatéral avec Anne pour qu'elle envoie un « coup de semonce » séparé à destination de chacun d'entre eux ; elle doit maintenant calculer  $N$  temps de parcours qui conduiront à  $N$  corrections. Cela commence à devenir compliqué et coûteux, et risque de décourager Anne.

### Le transfert de temps par observation simultanée

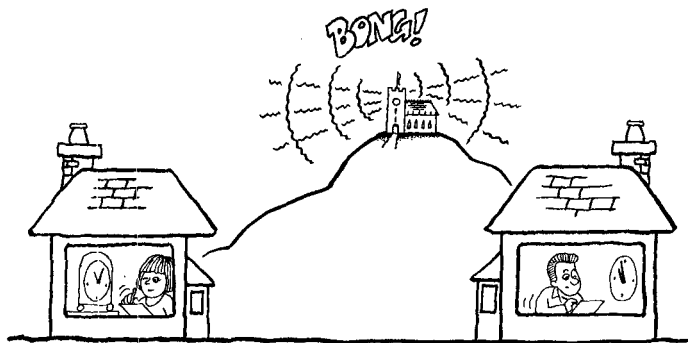
De son côté, Anne a réfléchi. Elle se dit que, d'accord, le transfert de temps par aller-retour est bien plus précis, mais à condition qu'il y ait tous ces réflecteurs et tous ces coups de semonce additionnels : tout cela devient bien complexe. N'existerait-il pas une méthode plus simple et plus économique de transférer une heure précise ? Elle a alors un éclair de génie – une idée qui sort des



48. Le transfert de temps par aller-retour. Si Anne mesure le temps d'arrivée chez elle de l'écho fourni par le réflecteur de Bill, elle peut choisir d'émettre son signal horaire peu avant midi, de telle façon que Bill le reçoive exactement à midi.

sentiers battus. Abandonnons le canon, se dit-elle, et revenons à notre clocher, non plus comme *source* de l'heure, mais comme *moyen de transfert*. Chaque jour, vers midi, elle attend la cloche de l'église, et mesure l'instant où elle sonne à l'aide de son horloge précise. En parallèle, Bill fait de même avec son horloge à lui. Anne envoie ensuite le résultat de ses mesures à Bill. Imaginons qu'Anne a entendu la cloche à 11:57:24, d'après son horloge. Bill a pour sa part mesuré 11:58:09, et il sait donc que son horloge avance de 45 secondes sur celle d'Anne. Comme dans la méthode précédente, ils peuvent répéter ces mesures pendant plusieurs journées consécutives, ce qui leur permettra en outre de comparer le taux d'avancement de leurs horloges (*voir la figure 49*).

Si l'horloge du clocher est exactement à la même distance des maisons d'Anne et de Bill, le son de la cloche leur parvient simultanément et aucune correction de temps de parcours n'est nécessaire. Si les distances sont différentes, la maison la plus proche entendra le son la première, et il faudra corriger l'heure de cette différence. Cette situation présente un avantage : le retard ne dépend plus



49. Le transfert de temps par observation simultanée. Anne et Bill mesurent simultanément l'instant où ils entendent la cloche de l'église à l'aide de leurs propres horloges. Cela permet à Bill de régler son horloge sur celle d'Anne, tout en tenant compte bien sûr du fait qu'ils habitent à des distances différentes de l'église. Dans ce cas, la précision intrinsèque de l'horloge de l'église n'a aucune importance.

que de la *différence* entre les distances des maisons au clocher, souvent bien inférieure à la distance entre les deux maisons.

De plus, l'heure à laquelle la cloche de l'église sonne *n'a absolument aucune importance*. La précision de cette horloge de clocher ne joue ici aucun rôle. Elle n'est utilisée que pour permettre à Anne et Bill d'échanger des informations sur leurs horloges. Autre avantage, l'horloge du clocher est totalement passive dans le processus de synchronisation des horloges d'Anne et de Bill : le sonneur de cloches peut parfaitement ignorer l'utilisation qu'ils en font.

Anne doit néanmoins prendre la peine d'envoyer ses mesures à Bill : le processus de transfert de temps n'est pas réalisé tant qu'elle ne l'a pas fait. Cette méthode pourrait d'ailleurs être utilisée pour disséminer l'heure dans tout le village – il suffirait qu'Anne affiche le résultat de ses mesures sur le panneau d'affichage public. Quoi qu'il en soit, cette méthode de transfert de temps par observation simultanée ne peut fonctionner que s'il y a coopération active entre l'émetteur et le destinataire de l'information temporelle. C'est la raison pour laquelle, contrairement à la méthode à sens unique, cette méthode d'observation simultanée n'est pratiquement jamais utilisée pour la diffusion du temps vers le public le plus large.

D'ailleurs, l'objet de l'observation simultanée n'a pas besoin d'être une horloge. Au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, on mesura la différence de longitude entre l'observatoire de Palerme, en Sicile, et la ville de Lecce, à 480 kilomètres de là, dans le talon de la botte italienne. Les astronomes chargés de cette mesure n'eurent qu'à s'allonger pour observer simultanément des météores ! En effet, ces météores se trouvent à une altitude suffisamment élevée pour que des observateurs assez éloignés puissent observer les mêmes. En mesurant l'instant d'apparition du météore avec des horloges réglées sur le temps solaire local, ils en déduisirent la différence de temps solaire local entre les deux sites d'observation, et donc la différence de longitude. Ces mesures atteignaient une précision de 4 secondes d'arc.

Chacun des trois principes de transfert du temps trouve ici ou là une application. La méthode à sens unique, simple et bon marché, est, comme nous allons le voir, la plus utilisée pour la diffusion de l'heure à un vaste public. Le transfert avec aller-retour est préférable quand la dépense supplémentaire se justifie par la nécessité d'obtenir la meilleure précision possible. Le transfert par observation simultanée est la meilleure méthode pour obtenir une excellente précision à petit prix : on l'utilise généralement pour le transfert de temps entre laboratoires.

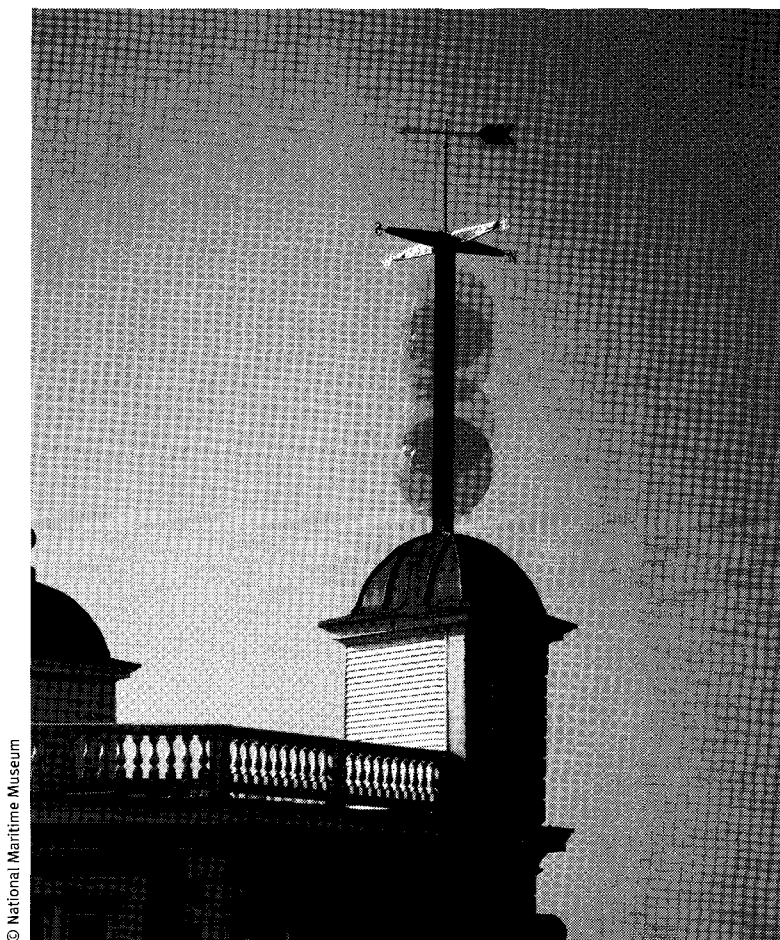
### **Des boules et des fusils qui donnent l'heure**

L'une des premières tentatives de diffusion de l'heure remonte à 1833, année où l'observatoire de Greenwich installa sur son toit une « boule à donner l'heure » (*voir la figure 50*). L'observatoire est situé dans le parc de Greenwich, sur une colline dominant une portion de la Tamise fort fréquentée à l'époque par les bateaux mouillant dans le port de Londres. Peu avant 13 heures, on hissait une grande boule rouge au sommet d'un mât situé sur le toit du bâtiment. À 13 heures précises, la boule était lâchée, ce qui permettait aux bateaux en visibilité directe de régler leur chronomètre de bord. Il semble que la boule horaire de Greenwich ait été le premier signal horaire régulier diffusé au public ; son utilisation pour la communication de l'heure aux bateaux de toutes nationalités semble bien être à l'origine de l'adoption de l'Heure de Greenwich (ou GMT) comme référence internationale. Il s'agit d'une méthode à sens unique, efficace pour la simple raison que le temps nécessaire à la lumière pour parcourir le kilomètre séparant l'observatoire de la Tamise était très inférieur à l'incertitude sur l'heure exacte du lâcher de la boule.

Bientôt, le télégraphe permit d'augmenter considérablement les distances de transfert du temps. En 1852, l'observatoire de Greenwich émit des signaux horaires issus d'une horloge de référence dans le but de synchroniser les horloges des autres observa-

## LE PARTAGE DU TEMPS

toires, ainsi que le lâcher de la boule horaire. Ces signaux étaient également distribués aux compagnies de chemin de fer ; quelques années plus tard, on trouvait de nombreuses boules horaires dans tout le Royaume-Uni, synchrones avec leur ancêtre de Greenwich.



50. La boule horaire de l'observatoire royal de Greenwich, le premier signal horaire régulier au monde destiné au public. Elle était lâchée chaque jour à 13 heures. Cette photo à plusieurs poses montre la boule dans quatre positions lors de son périple quotidien le long du mât.



En 1861, un fusil horaire fut mis en service au Château d'Édimbourg ; il était déclenché par l'Observatoire Royal voisin de Calton Hill. Deux ans plus tard, un fusil similaire était mis à feu chaque jour à 13 heures à Newcastle, déclenché cette fois par un signal télégraphique émis par Greenwich, à 400 kilomètres de là. Comme les signaux télégraphiques voyagent à une vitesse proche de celle de la lumière, le temps de parcours du signal était négligeable, malgré la distance accrue.

### **Des signaux horaires par radio**

Dans les années 1880, la découverte des ondes radio ouvrit de nouveaux horizons en matière de transfert du temps sur de grandes distances. En 1904, L'Observatoire Naval des États-Unis (USNO) inaugura les premiers signaux horaires radio, émis par le transmetteur de Navesink, dans le New Jersey ; un service régulier fut mis en service l'année suivante à partir de la ville de Washington. En 1910, des observatoires français et allemands émettaient à leur tour, les Français depuis le fameux émetteur de la Tour Eiffel. Ces signaux horaires radio, captés d'un bout à l'autre des continents, permirent aux astronomes de comparer directement, pour la première fois, les échelles de temps diffusées par plusieurs observatoires. On observa des écarts... embarrassants, qui conduisirent à la fondation du Bureau International de l'Heure, chargé, comme nous l'avons vu au chapitre 1, de mettre sur pied un système horaire international.

Les ondes radio se propagent dans le vide avec la vitesse de la lumière, soit près de 300 000 kilomètres par seconde. Dans l'atmosphère terrestre, elles vont un peu plus lentement – à environ 280 000 kilomètres par seconde. Cela implique qu'un signal horaire émis par une station suffisamment puissante peut être reçu à l'autre bout du monde 70 millisecondes plus tard. À l'époque où les premiers signaux horaires par radio furent émis, ce retard était sans importance, et la radio fournissait ce dont les gardiens du temps avaient toujours rêvé : une heure exacte disponible à tout moment,

partout sur la Terre – et instantanément. Toutefois, de nos jours, avec un UTC précis à quelques dizaines de nanosecondes, ces retards deviennent énormes et on ne peut plus les ignorer.

### **Les services à ondes courtes**

Environ une douzaine d'émetteurs radio à ondes courtes diffusent continûment ou presque des signaux horaires UTC à grande distance : ils comptent parmi les sources d'heure précise les plus appréciées. Leurs désignations et leurs fréquences sont données dans la figure 51. La plupart d'entre eux émettent sur des fréquences égales à, ou très proches de 2,5, 5, 10, 15, 20 ou 25 mégahertz. Les plus hautes de ces fréquences permettent en général une meilleure réception de jour, alors que les fréquences plus basses sont meilleures de nuit ; aussi, il vaut mieux qu'émetteur et récepteur soient tous deux dans l'ombre ou dans la lumière du jour. Dans de nombreux cas, la fréquence d'émission elle-même est synthétisée à partir de la même horloge UTC qui envoie les tops horaires, ce qui fait que ces stations de radio sont des étalons de fréquence assez précis en même temps que des dispensateurs de signaux horaires.

La plus célèbre de ces stations de radio est probablement WWV, sous le contrôle du NIST aux États-Unis. WWV a débuté ses transmissions à ondes courtes en 1923 et elle est aujourd'hui située à Fort Collins, à environ 75 kilomètres au nord de la division Temps et Fréquence du NIST, à Boulder dans l'État du Colorado. WWV a une sœur, WWVH, située à Kauai dans les îles Hawaï, qui émet en ondes courtes depuis 1948. Ces deux stations diffusent des tops horaires toutes les secondes ; des tops prolongés signalent une nouvelle minute, ou une nouvelle heure. Les nouvelles minutes sont précédées d'une annonce orale, par une voix d'homme (WWV) ou de femme (WWVH).

Elles tirent leurs signaux horaires d'horloges atomiques situées sur place ; leur précision est de 0,01 milliseconde par rapport à UTC(NIST). Pour les applications où une meilleure précision est nécessaire, le temps pris par les signaux pour se propager de l'émetteur

au récepteur doit être pris en compte. Ce retard est d'environ 1 milliseconde par 280 kilomètres parcourus.

Prenons un exemple : WWV, à Fort Collins, est à environ 7 500 kilomètres du NPL, à Teddington au Royaume-Uni. Si les signaux empruntaient le chemin le plus court, il leur faudrait 27 millisecondes pour arriver. En fait, ces signaux subissent de multiples réflexions entre la surface de la Terre et l'ionosphère. De plus, l'altitude et la densité de l'ionosphère varient au cours de l'année, de la journée, et même en fonction de l'activité magnétique du Soleil ; ce qui fait que ces signaux arrivent finalement au NPL avec une précision bien moindre que les 0,01 milliseconde à l'émission. Même avec des efforts acharnés pour estimer la distance parcourue, ils ne permettent pas d'obtenir mieux qu'une milliseconde. Pour la plupart des utilisations, c'est tout de même largement suffisant.

On peut appliquer la méthode des observations simultanées à ces signaux radio, tout comme pour l'horloge du clocher. Au chapitre 3, nous avons vu comment deux équipes de scientifiques collaborèrent pour étalonner la seconde atomique par rapport au Temps des Éphémérides. Le groupe de William Markowitz à l'USNO utilisait une caméra lunaire pour comparer la seconde du temps UT2 à celle du Temps des Éphémérides. Après quoi, il restait à transmettre le temps UT2, déterminé à l'USNO et « conservé » sur les horloges à quartz de l'observatoire, à travers l'Océan Atlantique vers le groupe de Louis Essen au NPL. Cet UT2 pouvait alors être comparé à une horloge à quartz tout à fait semblable, mais qui faisait fonction de « cadran » de l'horloge atomique du NPL. La solution retenue fut d'utiliser une méthode d'observations simultanées basée sur la station WWV.

C'est ainsi qu'une fois par mois, les deux groupes se mettaient à l'écoute des « tops » horaires de WWV, alors située à Greenbelt, près de la ville de Washington. L'USNO comparait ces tops à son heure UT2, pendant que le NPL faisait de même avec son étalon au césium. En échangeant leurs résultats, tout comme Anne et Bill, les deux groupes furent en mesure de comparer, au même moment, la seconde

de WWV à la leur. Le calcul du nombre de cycles du césium dans une seconde UT2 devenait alors très simple. Là encore, la durée exacte de la seconde de WWV n'avait pas d'importance ; elle n'était qu'un intermédiaire pour transporter le temps UT2 de l'USNO au NPL.

Il y avait un point délicat : WWV était bien plus proche de l'USNO que du NPL. Par conséquent, si on l'avait utilisé une *heure* plutôt qu'*un intervalle de temps* pour transférer, alors les distances de l'USNO et du NPL à l'émetteur auraient dues être prises en compte, avec en prime toutes les complications que nous avons évoquées plus haut. Comme on ne transférait que des *intervalles de temps*, les retards dus à la propagation des ondes radio n'avaient aucune importance, à condition qu'ils restent suffisamment constants d'une seconde à la suivante.

### **Les signaux horaires sur ondes longues**

Quiconque est muni d'une radio à ondes courtes du commerce, peut capter les tops de WWV ou de nombreuses autres stations similaires. Cependant, il existe d'autres stations, émettant à l'autre bout du spectre des ondes radio – en fait à des longueurs d'ondes non prévues sur les récepteurs ordinaires. Ces stations sont donc rarement écoutées par une oreille humaine ; leur but est de fournir des signaux horaires précis à des appareillages automatisés.

Parmi ces appareillages, l'horloge radio-pilotée vous est probablement le plus familier. Il s'agit d'une horloge à quartz reliée à un récepteur radio. La plupart des horloges radio-pilotées du Royaume-Uni sont à l'écoute permanente d'une station dénommée MSF, qui émet des tops horaires basés sur l'UTC(NPL). En plus de ces tops émis chaque seconde, MSF émet aussi la date et le moment de la journée sous forme codée, à partir desquels l'horloge indique l'heure exacte. Toute horloge radio-pilotée à partir des signaux de MSF, ou d'un autre émetteur, est capable d'effectuer toute seule le passage à l'heure d'hiver ou d'été ; elle peut même gérer les secondes intercalaires épisodiques, mais pas de la façon la plus élégante qui soit.

COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

Code	Lieu	Basse fréquence (kHz)	Haute fréquence (MHz)
ATA	New Delhi, Inde		10
BPM	Pucheng, Chine		5,10
BSF	Chung-Li, Taiwan		5,15
CHU	Ottawa, Canada		3,330; 7,335; 14,670
DCF77	Mainflingen, Allemagne	77,5	
HBG	Prangins, Suisse	75	
HLA	Taedok Science Town, Corée		5
JG2AS	Sanwa Ibaraki, Japon	40	
JJY	Sanwa Ibaraki, Japon		5; 8; 10
MSF	Rugby, Royaume-Uni	60	
RBU	Moscou, Russie	66,66...	
RWM	Moscou, Russie		4,996; 9,996; 14,996
TDF	Allouis, France	162	
VNG	Llandilo, Australie		2,5; 5; 8,638; 12,984
WWV	Fort Collins, États-Unis		2,5; 5; 10; 15; 20
WWVB	Fort Collins, États-Unis	60	
WWVH	Kauai, États-Unis		2,5; 5; 10; 15
YVTO	Caracas, Venezuela		5

51. Liste des stations de radio diffusant des signaux horaires UTC, en continu ou presque. Il existe d'autres stations intermittentes. Les émissions à haute fréquence sont captées par des récepteurs radio ordinaires. Les émissions à basse fréquence nécessitent la plupart du temps des récepteurs spéciaux ; on les utilise surtout pour le contrôle à distance d'appareillages automatisés. (Tableau extrait du rapport annuel 1998 de la section « temps » du BIPM.)

## LE PARTAGE DU TEMPS

MSF est située aux environs de la ville de Rugby, dans les Midlands anglais. Elle est entourée d'une forêt de mâts supportant d'autres émetteurs, entre l'autoroute M1 et la ligne de chemin de fer de Londres à Manchester (*voir la figure 52*). La station est contrôlée à partir des horloges atomiques du NPL, situé à 120 kilomètres au sud. Pour que votre information soit complète, sachez que le transfert de l'heure entre NPL et MSF s'effectue par une méthode d'observations simultanées à travers un émetteur de télévision situé entre les deux.



52. L'un des deux mâts de 250 mètres de haut supportant l'antenne de la station MSF, près de la ville de Rugby. MSF émet des signaux horaires en continu à une fréquence de 60 kilohertz ; ceux-ci sont utilisés en particulier pour le contrôle à distance d'horloges radio-pilotées, ou d'autres appareillages.

MSF émet sur une fréquence de 60 kilohertz, ce qui correspond à une longueur d'onde de 5 kilomètres. Ces ondes radio très longues – trop pour être captées par un récepteur ordinaire – voyagent près du sol et peuvent ainsi suivre la courbure de la surface de la Terre sur plusieurs milliers de kilomètres. C'est un avantage par rapport aux signaux à ondes courtes, car elles suivent ainsi le chemin le plus court de l'émetteur au récepteur, sans perdre leur temps dans d'incessantes réflexions, variables qui plus est selon les conditions ambiantes. En pratique, on peut utiliser les signaux de MSF jusqu'à une distance de 2 000 kilomètres, ce qui inclut la plupart de l'Europe de l'Ouest.

Des stations de basse fréquence similaires existent en Europe, par exemple HBG en Suisse ou DCF77 en Allemagne<sup>23</sup>. DCF77 émet sur 77,5 kilohertz, depuis Mainflingen, à 25 kilomètres au sud-est de Francfort, et elle est pilotée par les remarquables horloges atomiques du PTB de Brunswick. Ses signaux sont utilisés dans toute l'Europe pour le contrôle d'horloges de chemin de fer, d'horloges domestiques radio-pilotées, et même de montres-bracelets ainsi que de feux routiers tricolores ! Aux États-Unis, WWVB émet à 60 kilohertz à partir du même site que WWV et couvre la totalité de l'Amérique du Nord.

Grâce aux conditions de propagation plus stables pour ces ondes de basse fréquence, les signaux horaires émis par ces stations sont reçus avec une précision de 0,1 milliseconde – soit 10 fois mieux qu'avec les ondes courtes – mais cela ne dispense pas, bien au contraire, d'effectuer la correction de temps de propagation. Les transmissions radio basse fréquence sont devenues le principal moyen, et le meilleur marché, de diffusion de l'UTC à partir des centres nationaux de mesure du temps.

### **Avoir l'heure par téléphone**

Si vous ne possédez pas de radio à ondes courtes, vous pouvez toujours téléphoner à WWV ! Toutefois, à cause du chemin impré-

---

*23. Une description en français du système de codage, également utilisé par l'émetteur d'Allouis (France Inter grandes ondes) peut être trouvée sur Internet à l'adresse suivante : <http://perso.wanadoo.fr/tvignaud/am/allouis/allouis-heure.htm>*

visible emprunté par votre communication dans le réseau téléphonique, la précision ne dépasse en général pas 30 millisecondes à l'intérieur des États-Unis ; elle est sûrement bien pire si vous téléphonez d'ailleurs. Cela n'empêche pas le téléphone d'être un moyen efficace et apprécié de diffusion d'une heure exacte. Il existe aujourd'hui deux types de service horaire téléphonique.

La plupart des compagnies téléphoniques proposent un service d'horloge parlante. Au Royaume-Uni, c'est la poste qui en prit l'initiative en 1936, car des particuliers téléphonaient sans cesse aux opératrices pour leur demander l'heure. À l'aide d'un système de disques de verre en rotation, des segments de phrases enregistrés étaient assemblés pour reconstituer des phrases annonçant l'heure « au quatrième top ». En 1963, les disques de verre cédèrent la place à des enregistrements magnétiques, eux-mêmes remplacés en 1984 par l'actuel système numérique. Ce service a été privatisé et est maintenant proposé par *British Telecom* sous le nom de « *Timeline* » ; il continue à proposer l'heure six fois par minute, entrecoupée de messages publicitaires d'un sponsor.

Ce service s'appuie sur deux paires d'horloges à quartz, l'une à Londres, l'autre à Liverpool. À chaque moment, une paire est en service et fournit le service horaire, pendant que l'autre fonctionne « en fantôme », en cas de panne. Chaque matin à 09:55, ces horloges sont automatiquement comparées à l'UTC(NPL) à l'aide de signaux transportés par ligne terrestre depuis l'émetteur de MSF, après application des corrections nécessaires. *British Telecom* garantit à ses clients que les signaux horaires, quand ils les atteignent, sont à moins de 50 millisecondes de l'UTC(NPL) ; en pratique, la précision est la plupart du temps supérieure à 5 millisecondes. Ce service d'horloge parlante reçoit environ un million d'appels par semaine, avec un pic d'appels très net immédiatement après les changements d'heure, vers l'heure d'été ou d'hiver.

Chaque jour apporte ses nouvelles merveilles issues du *World Wide Web*. On peut aujourd'hui, par exemple, se connecter au site



de l'horloge atomique principale de l'USNO, et voir l'UTC(USNO) défiler sur son écran. Quelle satisfaction intellectuelle ! Mais, cette heure qui s'affiche, laquelle est-ce ? Il faut à tout le moins plusieurs secondes à cette page web pour traverser l'Atlantique, et donc l'heure qui s'affiche, est non pas celle de « maintenant », mais celle d'« il y a quelques secondes ». Combien de secondes ? Ah, ça, on l'ignore ! Autrement dit, malgré son affichage esthétique, la précision fabuleuse de l'UTC(USNO) ne nous est pas accessible.

Quelle frustration ! D'autant plus que notre ordinateur domestique aurait bien besoin de signaux horaires précis. Face à la puissance de calcul sidérante du moindre PC, même le moins cher, les utilisateurs sont surpris et déçus de sa capacité très limitée à donner une heure exacte à partir de l'horloge interne. Les horloges de PC dérivent facilement de plusieurs secondes par jour, et il faut les réajuster fréquemment. Si seulement on pouvait les connecter à une horloge atomique qui les remettrait sur le droit chemin !

Eh bien, c'est possible : plusieurs centres nationaux proposent justement un tel service. Le NPL par exemple, offre son service *Truetime*<sup>24</sup>, qui fournit l'heure exacte à tout ordinateur qui le demande. Il faut d'abord installer le logiciel, téléchargeable depuis le site Internet du NPL, et composer le numéro de téléphone de *Truetime*. L'horloge du PC reçoit alors un signal horaire de l'horloge UTC du NPL, et le logiciel se charge de mettre l'horloge à l'heure avec une précision de 20 millisecondes. Si par hasard cette précision ne vous suffit pas, *Truetime* dispose d'un mode de transfert en aller-retour. Votre PC envoie alors un signal à l'ordinateur de *Truetime* et, après quelques allers-retours, ils disposent d'une estimation du temps de transmission. L'ordinateur du NPL envoie alors à votre PC un signal corrigé, qui permet de caler l'horloge de votre PC sur l'UTC(NPL) à mieux que 1 milliseconde.

---

24. *L'heure exacte, en français (N.d.T.).*

NPL n'est pas le seul à offrir un tel service ; nous ne l'avons évoqué ici qu'à titre d'exemple. Évidemment, une fois votre PC remis à l'heure, son horloge va recommencer à dériver. Là, que faire d'autre que se plaindre au constructeur du PC, ou bien acheter une nouvelle carte horloge (ou bien rappeler *Truetime*) ?

### **L'heure qui tombe du ciel**

Si vous vous contentez de la milliseconde, alors il est inutile de chercher plus loin que les signaux radio. Si vous êtes dans les chemins de fer, et si vous souhaitez que vos trains arrivent à l'heure, il suffit de contrôler vos horloges en les comparant à un service radio tel que MSF ou DCF77 ; cela ne vous reviendra pas cher. Que doivent faire ceux qui ont besoin d'une heure plus précise ?

Cela fait bien longtemps que l'emploi de satellites en orbite terrestre pour diffuser l'heure trottait dans la tête des gardiens du temps. Depuis 1974, les signaux horaires du NIST sont disponibles via deux satellites météo géostationnaires, l'un au-dessus de l'Amérique du Sud, l'autre du Pacifique. Ces satellites sont sur une orbite où la période de révolution est de 24 heures, et ils semblent rester fixes dans le ciel. La station terrestre de Wallops Island, dans l'État de Virginie, leur envoie des signaux horaires, et ils les relaient vers l'Amérique du Nord et du Sud, ainsi que vers la majeure partie du Pacifique et de l'Atlantique. Étant donnée leur altitude, les signaux envoyés par ces satellites sont sciemment avancés de 260 millisecondes sur l'UTC(NIST) lors de leur émission, de sorte que, quand ils retournent sur la Terre, ils y arrivent à peu près au bon moment. Si vous disposez du récepteur approprié pour ces signaux, la précision disponible est d'environ 0,1 milliseconde.

Dans ce domaine, rien n'est comparable à la mise en place progressive, depuis les années 1980, des systèmes de navigation par satellites GPS et GLONASS. Le GPS comprend une constellation de 24 satellites Navstar, du ministère américain de la Défense. GLONASS (*Global Navigation Satellite System*, pour système global

de navigation par satellite) est constitué d'un réseau similaire, géré par les militaires russes. S'il dispose du récepteur approprié, un utilisateur du GPS ou de GLONASS peut déterminer sa position au sol à quelques mètres près. Le but principal de ces réseaux est militaire –le GPS a permis aux forces coalisées des Nations Unies d'avancer rapidement dans le désert irakien lors de la Guerre du Golfe en 1991 ; mais les informations sont également disponibles pour des applications civiles, dont le nombre augmente en permanence.

Le GPS est plus connu que GLONASS, et des récepteurs GPS sont aujourd'hui aisément disponibles pour une grande gamme d'activités civiles. Le GPS émet en continu des signaux horaires et de position, et ce depuis chacun des 24 satellites. Ceux-ci orbitent à 20 000 kilomètres du sol, et au moins cinq d'entre eux sont visibles de tout point de la Terre à chaque instant. En comparant les moments auxquels les signaux des satellites sont reçus, le récepteur calcule sa position sur la Terre avec une excellente précision.

Le GPS ne fonctionne que parce que chaque satellite est pourvu d'une horloge atomique. Les satellites GPS de première génération étaient équipés d'horloges au rubidium, mais la génération actuelle est passée aux horloges à césium, semblables à celles que l'on trouve « dans le commerce » (*voir le chapitre 4*). Ces horloges sont sous le contrôle permanent du centre de suivi des satellites GPS, qui leur envoie les éventuelles corrections nécessaires à leur bonne synchronisation.

L'échelle de temps diffusée par les satellites a reçu le nom d'heure GPS, et elle est déduite de l'UTC(USNO). Le GPS n'a pas prévu la prise en compte des secondes intercalaires : l'heure GPS est donc une continuation de l'UTC de 1980, année où le système est devenu opérationnel. Elle est donc, et de façon permanente, en retard de 19 secondes sur le TAI ; début 2003, elle avait 13 secondes d'avance sur l'UTC. Si l'on oublie ces secondes intercalaires, le cahier des charges de l'heure GPS exige que cette dernière ne s'écarte pas de plus d'une microseconde de l'UTC(USNO) ; en

pratique, l'accord est bien meilleur, car les écarts ne dépassent pas 30 nanosecondes. Jusqu'à tout récemment, peu de gens avaient accès à la pleine précision du GPS, en raison de la politique du gouvernement américain qui dégradait intentionnellement la qualité des signaux GPS diffusés aux civils, et réservait la précision maximale aux applications militaires. À la surprise générale, cette barrière a été levée en mai 2000 ; la corporation des gardiens du temps s'en est fort réjouie !

Le système russe GLONASS a mis plus de temps à trouver son public ; il souffre d'une fiabilité moins bonne. Comme le GPS, il est censé disposer d'une constellation de 24 satellites, mais nombreux sont ceux qui sont tombés en panne ; au printemps 2000, seuls 10 demeuraient opérationnels<sup>25</sup>. L'heure diffusée depuis les horloges des satellites – l'heure GLONASS – est dérivée de l'UTC(SU), la version russe de l'UTC. À la différence du GPS, l'heure GLONASS prend en compte les secondes intercalaires et elle n'a été affectée d'aucune dégradation volontaire de la précision à des fins militaires.

Si l'on veut faire encore mieux, il faut se procurer les corrections quotidiennes à appliquer à l'heure GPS ou GLONASS pour obtenir l'UTC ; elles sont publiées dans la circulaire T du BIPM. À l'automne 1999, l'heure GPS différait de moins de 30 nanosecondes de l'UTC (si l'on oublie les 13 secondes intercalaires), alors que l'heure GLONASS retardait de 300 à 400 nanosecondes sur l'UTC. L'incertitude quotidienne du GPS est d'environ 10 nanosecondes, à comparer à plusieurs centaines pour le GLONASS ; la cause en est la difficile caractérisation des retards temporels intervenant dans le système multifréquence du GLONASS.

Même sans les corrections de la Circulaire T, l'heure diffusée par ces satellites est de loin plus précise que celle de toute autre

---

*25. Au printemps 2002, il n'en restait plus que 6 ; en revanche, il y a 28 satellites GPS en orbite (N.d.T.)*

source. Il est clair que le GPS, et dans une moindre mesure le GLO-NASS, sont aujourd'hui les meilleurs moyens disponibles de diffusion de l'UTC n'importe où sur notre planète.

Le GPS est encore plus utile quand on s'en sert en mode d'observations simultanées. Depuis 1995, le BIPM effectue les transferts d'heure des centres nationaux vers Paris par cette méthode d'observations simultanées des satellites du GPS. Deux centres suivent le même satellite, et comparent leurs horloges UTC à celle du satellite en question. Tous les six mois, le BIPM publie son plan de bataille : il s'agit d'un planning quotidien indiquant qui doit suivre quel satellite, et à quelle heure. Les satellites sont suivis pendant 13 minutes, et le début et la fin de ces périodes de suivi sont synchronisés à mieux qu'une seconde. Les centres européens font environ 30 suivis par jour (voir la figure 53). Ils envoient ensuite leurs observations au BIPM, qui en tire d'abord la différence d'UTC pour chaque paire de centres ; toutes ces différences sont ultérieurement analysées ensemble pour le calcul du TAI, comme nous l'avons décrit au chapitre 4.

Le réseau de transfert de l'heure du BIPM s'appuie sur trois « carrefours en étoile », l'un en Europe (l'Observatoire de Paris, ou OP), le second en Amérique du Nord (l'Institut américain des Étalons et de la Technologie, ou NIST), et le troisième en Asie (le Laboratoire de Recherche sur les Communications, ou CRL, à Tokyo). Les liaisons entre OP et NIST, et entre OP et CRL y occupent un rôle central : les délais de transmission en sont mesurés régulièrement, en particulier ceux dus à l'ionosphère. L'expérience a montré que la dégradation volontaire des signaux horaires du GPS peut être complètement contournée quand on utilise les méthodes d'observations simultanées<sup>26</sup>. Dans ce cas, la précision d'un transfert de temps est de 3 nanosecondes à l'échelle d'un continent, et

---

26. C'est d'ailleurs peut-être en partie pour cette raison que le brouillage partiel des signaux GPS a été supprimé (N.d.T.).

## LE PARTAGE DU TEMPS

de 5 pour des laboratoires situés dans des continents différents. Le BIPM publie également des plannings d'observation pour GLO-NASS ; dix centres y participent, mais leurs résultats ne sont pas encore inclus dans le calcul du TAI.

La plus grande source d'erreur systématique dans l'utilisation des signaux horaires du GPS ou de GLONASS est l'incertitude sur la position au sol de l'antenne réceptrice. Pour obtenir une précision d'une nanoseconde, il faudrait connaître la position de l'antenne à mieux que 30 centimètres. On s'efforce d'y arriver en déterminant la position de chacun des centres contribuant au TAI à l'aide du

© Crown Copyright 2000. Avec l'autorisation du contrôleur de l'HMSO



53. Une forêt de récepteurs en cours de test sur le toit du laboratoire de transfert du temps du NPL. La parabole de droite sert au transfert de temps par aller-retour avec des satellites de communication géostationnaires.

Système de Référence Terrestre établi par l'IERS, comme nous l'avons vu au chapitre précédent.

### **Le transfert de l'heure et la relativité**

La précision avec laquelle un signal horaire est aujourd'hui créé et échangé entre différents centres est devenue telle que les actuels gardiens de l'heure sont confrontés à des complications qui n'auraient pas effleuré ceux de la génération précédente. Les plus importantes sont dues à des effets subtils mais bien réels prédits pour la première fois dans la théorie de la relativité d'Albert Einstein.

La relativité a renouvelé notre façon de concevoir l'espace et le temps. Il n'est pas étonnant que cette nouvelle conception affecte la mesure précise du temps – le sujet de ce livre. Les conséquences pratiques pour les laboratoires de mesure du temps sont doubles : la théorie de la relativité dite restreinte (1905) décrit l'écoulement du temps pour deux horloges en mouvement relatif – et cela inclut les satellites et les horloges sur la surface de la Terre en rotation ; la théorie dite générale (1915) décrit comment la présence d'un champ de gravitation affecte l'écoulement du temps. Les écarts que prévoit la relativité – par rapport à l'ancienne vision newtonienne d'un temps « absolu » – sont très faibles, mais il est devenu impossible de les ignorer aujourd'hui quand on transfère l'heure d'un laboratoire à l'autre, notamment quand le BIPM calcule le TAI à partir d'horloges réparties tout autour du Globe.

Arrêtons-nous sur ces effets « relativistes ». Il en existe trois que nous devons prendre en considération. Le plus célèbre a reçu le nom de « dilatation des durées », et on peut le résumer d'une phrase lapidaire : « les horloges en mouvement retardent ». Un observateur au sol voit une horloge embarquée sur un avion retarder par rapport à la sienne propre. Cela ne s'arrête pas là ! Il est plus surprenant que les horloges au sol, vues par un passager de l'avion, semblent, elles aussi, retarder par rapport à l'horloge de l'avion ! La dilatation des durées est d'autant plus importante que la vitesse

relative s'approche de celle de la lumière – en fait, si l'on était capable d'atteindre cette vitesse, le temps s'arrêterait complètement. Bien que la vitesse de nos satellites GPS soit nettement inférieure à celle de la lumière (environ 100 000 fois plus faible), la précision atteinte aujourd'hui dans la mesure du temps nécessite la prise en compte du mouvement de chaque horloge ! Notons que cela ne concerne en rien les étalons primaires, qui sont fixes, comme d'ailleurs les 260 horloges secondaires : pas de mouvement, pas de dilatation des durées ; aucune correction de ce type n'est nécessaire quand on les utilise pour calculer le TAI.

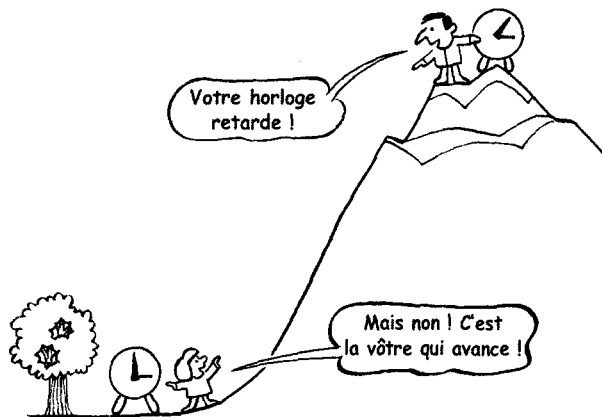
Le second effet relativiste, lui, est omniprésent. En 1907, Einstein a montré qu'une horloge placée dans un champ gravitationnel voit le temps s'écouler d'autant plus lentement que le champ est intense. Le champ de gravité terrestre est plus intense quand on s'approche du centre de la Terre : une horloge atomique au niveau de la mer bat donc plus lentement qu'une horloge située sur une montagne. Cet effet est dénommé décalage gravitationnel ; il n'a absolument rien à voir avec un quelconque détail du mécanisme de l'horloge, car il est dû à une propriété intrinsèque de l'espace-temps.

En 1980, conscient de l'importance de cet effet, un groupe de travail de la CIPM, avait recommandé de définir l'unité de temps du TAI comme étant la seconde SI « obtenue sur le géoïde en rotation ». Ce « géoïde » n'est autre que l'équivalent, en langage géophysique, du bon vieux « niveau de la mer ». Si la Terre était entièrement faite d'eau, sa surface définirait le géoïde. En fait, le géoïde n'est pas sphérique à cause de l'aplatissement de la Terre aux pôles dû à sa rotation ; la différence entre le diamètre équatorial et le diamètre polaire vaut tout de même 42 kilomètres. Le géoïde est aussi affecté par endroits par des hétérogénéités de la croûte terrestre, ainsi que par la présence des montagnes. Il est important de préciser qu'il est « en rotation », car le géoïde serait nettement plus sphérique si la Terre ne tournait pas. Le point important, en ce qui



concerne la mesure du temps, est que le « potentiel » gravitationnel de la Terre – une sorte de mesure de la variation de la gravité avec la distance – est identique partout sur le géoïde. Si l'on place deux horloges semblables au repos et au niveau de la mer, la relativité dit que, même très éloignées, elles battront au même rythme. La conséquence pratique pour les gardiens du temps est que l'affichage des étalons primaires doit être corrigé en fonction de leur altitude au-dessus du niveau de la mer avant qu'on puisse tous les combiner pour calculer le TAI. Les étalons sont aujourd'hui si précis que cette correction est indispensable (*voir la figure 54*).

Parlons chiffres. Pour chaque kilomètre d'altitude au-dessus du niveau de la mer, une horloge semblera battre plus vite d'environ 1,1 partie pour  $10^{13}$ . Au bout d'un jour, l'effet net est de 9,43 nanosecondes par kilomètre ; pour des altitudes supérieures à 25 kilomè-



54. En montagne, les horloges avancent. Deux horloges réglées en un même lieu pour battre exactement au même rythme vont diverger si l'une d'entre elles est transportée en altitude. Une observatrice restée dans la vallée considèrera que l'horloge de montagne « avance » ; son collègue parti en montagne jugera lui que l'horloge de la vallée « retarde ». Cette différence est un effet de la relativité du temps, qui doit être pris en compte avant de combiner les mesures des différentes horloges atomiques de la planète.

tres, cette correction simple ne marche plus et il faut utiliser une formule plus complexe. NIST-7, l'étalon primaire de fréquence américain que nous avons rencontré au chapitre 4, est installé à Boulder dans l'État du Colorado, 1 650 mètres au-dessus du niveau de la mer. Par rapport à une horloge située au niveau de la mer, la seconde de NIST-7 est plus courte que la seconde SI d'environ  $1,80 \text{ partie pour } 10^{13}$ , soit 15,6 nanosecondes par jour. Cette faible différence doit être prise en compte par le BIPM quand l'EAL est étalonnée pour obtenir le TAI. Elle a beau sembler minuscule, elle est 45 fois supérieure à la précision actuelle sur la seconde de TAI.

Qu'en est-il des horloges atomiques embarquées sur des satellites ? À cause de leur altitude élevée et de leur grande vitesse, ce sont elles qui sont les plus affectées par ces deux effets relativistes. La vitesse orbitale des satellites GPS est telle qu'un observateur au niveau de la mer les verrait retarder de 7,1 microsecondes (7 100 nanosecondes) par jour, s'il n'y avait pas, en plus, leur altitude élevée, qui tend au contraire à les faire avancer de 45,7 microsecondes par jour. La combinaison de ces deux effets confère une avance nette de 38,6 microsecondes par jour. Heureusement, les concepteurs du GPS étaient prévoyants, et les horloges atomiques des satellites furent réglées avant le lancement pour retarder, au niveau de la mer, de la même quantité. Tout est bien qui finit bien : une seconde reçue au niveau de la mer d'un satellite GPS est très proche de la seconde SI. Comme rien n'est parfait, pas plus là-haut qu'en ce bas monde, les orbites de ces satellites ne sont pas parfaitement circulaires, ce qui fait que l'altitude et la vitesse des satellites varient légèrement : cela aussi est prévu, et les récepteurs GPS savent effectuer la correction nécessaire. Notons un avantage du système GLONASS : les orbites y sont quasi-circulaires et aucune correction n'est requise pour les récepteurs GLONASS.

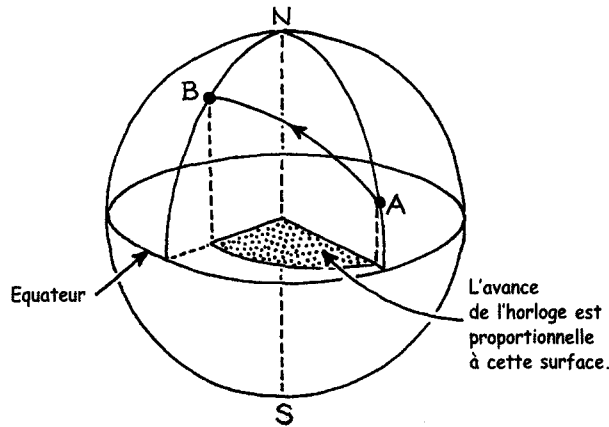
Il existe un troisième effet – conséquence de la relativité lui aussi –, l'effet Sagnac, bien curieux en apparence et peu connu du public. Supposons que nous disposions de deux horloges parfaites, réglées pour avoir le même battement, situées sur l'équateur. Prenons

l'une d'elles et déplaçons-la, aussi lentement que nous le souhaitons, par exemple par bateau vers l'est, le long de l'équateur. Le fait de rester au niveau de la mer garantit que nous demeurons sur le géoïde, et nous effectuons un voyage très lent pour éviter la dilatation des durées. Quand l'horloge voyageuse revient à son point de départ après un tour entier de la Terre, montrera-t-elle la même heure que sa collègue restée immobile ? En ne tenant compte que de la dilatation des durées due à la vitesse et de l'avance des horloges d'altitude, nous pourrions croire que c'est le cas. La réalité est tout autre : l'horloge mobile retarde de 207 nanosecondes par rapport à l'autre. Plus étrange encore, si nous recommençons l'expérience avec une horloge allant très lentement dans l'autre sens, vers l'ouest, alors elle avancera de 207 nanosecondes au lieu de retarder.

Quand on analyse la situation, on se rend compte que n'importe quel déplacement à la surface de la Terre se traduit par un tel décalage Sagnac des horloges, proportionnel à la surface balayée lors du voyage, surface projetée sur le plan de l'équateur (*voir la figure 55*). On peut donc échapper à l'effet Sagnac : il suffit de déplacer les horloges suivant un méridien, ce qui implique malheureusement de passer par le pôle Nord ou le pôle Sud. Cet effet Sagnac semble bien mystérieux, mais ce n'est en fait qu'un des nombreux déguisements de la dilatation des durées – des objets fixes à la surface de la Terre ne sont pas fixes du tout, puisqu'ils tournent avec la Terre, à une vitesse qui dépend de leur latitude. Il serait plus simple de comparer nos horloges en mouvement avec une horloge stationnaire au centre de la Terre ; comme cela est malheureusement irréalisable, nous nous contentons de faire comme si nos horloges au sol étaient fixes, et nous rajoutons l'influence de l'effet Sagnac chaque fois que c'est nécessaire.

Considérons un exemple de l'influence de ces effets relativistes dans la mesure pratique de l'heure : imaginons que les chercheurs du PTB de Brunswick veuillent envoyer une horloge à l'USNO de Washington pour la comparer directement avec les hor-

## LE PARTAGE DU TEMPS



55. L'effet Sagnac. Quand on déplace une horloge à la surface de la Terre du point A vers le point B, elle enregistre un temps additionnel par rapport à une horloge restée en A. Cet intervalle de temps est proportionnel à la surface grisée de la figure. Cette surface doit être comptée comme positive pour les voyages vers l'ouest (gain de temps) et négative si l'on va vers l'est (perte). L'intervalle vaut 1,62 nanoseconde pour chaque million de kilomètres carrés.

loges américaines. Décision est prise de la faire voyager par avion de Berlin à Washington, soit une distance de 6 700 kilomètres. Pour simplifier, supposons que ce soit un voyage sans correspondance, à la vitesse constante de 800 kilomètres par heure, et à une altitude constante de 10 000 mètres. À son arrivée à Washington, l'horloge du PTB aura perdu 8,3 nanosecondes à cause de la dilatation des durées, gagné 32,9 nanosecondes à cause du décalage gravitationnel, et gagné encore 18,8 nanosecondes par effet Sagnac. Si l'horloge était réglée sur l'UTC au décollage, elle indique après l'atterrissage UTC plus 43,4 nanosecondes. Quand les chercheurs du PTB veulent récupérer leur horloge, si elle a été remise à l'heure UTC à Washington, elle n'avancera plus que de 5,8 nanosecondes sur l'UTC en arrivant à Berlin, à cause de l'effet Sagnac qui change de signe suivant le sens du voyage. J'espère que ce simple exemple vous

aura convaincu que l'effet du décalage horaire est bien plus ravageur quand on vole vers l'ouest...

### **Au sixième top...**

Pour clore ce chapitre, nous allons résumer la façon dont la diffusion du temps a évolué au cours du XX<sup>e</sup> siècle, en donnant l'exemple de la Grande-Bretagne. Depuis 1924, la BBC diffuse un signal horaire qu'on a pris l'habitude d'appeler les « six tops ». À l'origine, ces « tops » étaient diffusés par l'Observatoire royal de Greenwich (RGO), c'est pourquoi on les connaît aussi sous le nom plus officiel de « signal horaire de Greenwich ».

Aux débuts du service, en 1924, les signaux étaient contrôlés par une horloge de Shortt à pendule libre, celle-la même que nous avons décrite au chapitre 2. L'horloge était réglée sur le GMT, qu'on appellerait aujourd'hui plutôt l'UT0, déterminé à partir d'observations obtenues au cercle méridien de l'observatoire (*voir la figure 38*). Les six tops qu'on entendait à la radio provenaient de l'horloge « esclave » de Shortt ; ils étaient émis lorsqu'un mécanisme ad hoc fermait un contact électrique dans l'horloge. Les cinq premiers tops décomptaient les secondes jusqu'au sixième, qui était le signal horaire proprement dit.

Ce système fonctionna jusqu'en 1949, année où l'horloge de Shortt fut remplacée par une horloge à quartz située au château d'Herstmonceux, dans le Sussex, nouveau siège du RGO. Une fréquence d'un kilohertz fournie par l'horloge à quartz servait à piloter un « moteur phonique » qui, par l'intermédiaire d'une série d'engrenages, permettait de faire tourner un disque à la vitesse d'un tour par seconde. Un faisceau de lumière se réfléchissait sur une surface argentée du disque, créant ainsi des flashes lumineux toutes les secondes ; ceux-ci étaient détectés électroniquement et transformés en tops sonores.

Ce n'est qu'en 1967 que le RGO acquit enfin une horloge au césium – une Hewlett-Packard 5060A – ce qui n'empêcha pas le

disque tournant de continuer à engendrer les fameux tops. À partir de 1972, les tops ne donnaient évidemment plus l'heure GMT, mais UTC. Les auditeurs de la BBC les plus attentifs ont même pu entendre occasionnellement un septième top – chaque fois qu'une seconde intercalaire était introduite dans l'UTC. À la même époque, on décida d'allonger la durée du dernier top, pour distinguer celui qui donnait le vrai signal horaire. Dans les années 1980, l'horloge au césium fut remplacée par un récepteur GPS ; le moteur phonique et le disque tournant restèrent en service jusqu'en 1990, année du déménagement du RGO à Cambridge et de la fin de son implication dans la diffusion de l'heure au public.

La responsabilité de la diffusion des six tops passa alors entièrement à la BBC. Ses signaux horaires proviennent de deux récepteurs GPS – utilisés pour fabriquer des impulsions d'UTC toutes les secondes – et un récepteur MSF – servant à les « étiqueter » avec une information codant le jour et l'heure. Les émissions radio suivent un chemin tortueux entre le studio et les nombreux émetteurs ; les tops sont néanmoins fabriqués en tenant compte de ce délai de transmission, de telle sorte qu'ils sont émis aussi près que possible du bon moment. Si votre préoccupation est d'avoir la meilleure précision horaire possible, choisissez sans hésiter l'émetteur de 198 kilohertz de Droitwich, qui émet le programme radio BBC-4 sur les grandes ondes : il bénéficie d'une attention particulière. Au Royaume-Uni, la précision sur l'heure de réception de ses signaux est supérieure à 50 millisecondes.

Pour conclure sur une note nostalgique, non seulement les signaux horaires dits « de Greenwich » n'ont plus rien à voir avec le GMT, comme nous l'avons déjà vu au chapitre 4, mais en plus, depuis plusieurs années, ils ont perdu tout lien avec l'observatoire de Greenwich proprement dit. Enfin – ce qui porte un coup fatal à la fierté toute britannique de ceux qui s'imaginent que la Grande-Bretagne a une sorte de droit de propriété sur la source de l'heure – les signaux émis par la BBC ne viennent même pas de Grande-

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

Bretagne ; ils sont fabriqués à partir des émissions des satellites GPS, eux-mêmes pilotés à partir des horloges atomiques de l'observatoire naval des États-Unis, à Washington.

# 7

## **Une heure précise : pour qui, pourquoi ?**

À quoi sert d'avoir une heure précise ? Pourquoi diable aurait-on besoin de connaître l'heure à un millionième ou un milliardième de seconde ? Une telle précision semble au premier abord ridicule et sans aucune portée dans la vie de tous les jours. Il est probable que seule une poignée de savants a vraiment besoin de ces raffinements ! Pourtant, l'économie des pays développés dépend de plus en plus de cette heure précise fabriquée par les horloges atomiques. Sans elle, la vie moderne serait bien différente, comme nous allons le voir au cours de ce chapitre.

### **L'heure pour tous**

Commençons par un fait : grâce aux horloges atomiques, et avec le renfort des oscillateurs à quartz, le temps et la fréquence sont les quantités physiques les mieux mesurées, et de la façon la plus économique. Un intervalle de temps peut être mesuré mille fois plus précisément qu'une distance, et un million de fois mieux qu'une masse. Pour une précision donnée, le coût d'une mesure de temps n'atteint même pas un pour cent de celui de toute autre mesure. À tel point que, si l'on veut mesurer précisément une grandeur physique, il faut se débrouiller pour la relier à une fréquence ou à un temps.



L'heure précise n'est plus inaccessible. Jusqu'à tout récemment, lorsqu'on voulait disposer d'une heure vraiment précise, il fallait s'offrir sa propre horloge atomique, parmi les modèles du commerce que nous avons discutés au chapitre 4. Aujourd'hui, de nombreuses applications qui, par le passé, requéraient des horloges atomiques locales, se font bien plus aisément avec des signaux horaires radio ou GPS ; la conséquence la plus étonnante en est qu'il est plus facile aujourd'hui d'obtenir une heure extrêmement précise qu'une heure d'une précision moyenne. Nous venons de voir que les signaux horaires de la BBC sont tirés du GPS. La radio ou le GPS sont tellement bon marché et commodes qu'on les utilise tout simplement parce qu'ils sont là, parce qu'ils sont plus accessibles. À quoi bon régler son horloge si un émetteur radio ou un satellite peut le faire automatiquement à votre place ?

Conséquence de tout cela, une heure très précise est maintenant disponible pour tous, en tout point du Globe. Les signaux horaires sont partout, 24 heures par jour. Même la caste des gardiens du temps, les scientifiques qui s'occupent des centres horaires nationaux, ignore qui utilise ses signaux horaires et à quelle fin. Dans ce chapitre, nous allons décrire quelques utilisations de l'heure précise, tout en sachant fort bien que nous en oublierons sûrement la majorité !

### **La nature du temps et de l'espace**

Autant commencer par l'application la plus logique – et la plus fondamentale – des horloges précises : l'étude de la nature du temps proprement dit. Au chapitre précédent, nous avons remarqué que les horloges atomiques sont aujourd'hui si précises que leur emploi nécessite de prendre en compte quotidiennement des corrections « relativistes » minimales – celles qui sont dues à des effets des théories de la relativité d'Einstein. Pour la même raison, on peut « prendre le problème à l'envers » et utiliser les horloges comme *outils* d'étude et de mesure des prédictions de la relativité ; nous

espérons par là en apprendre plus sur la nature profonde du temps et de l'espace.

L'une des prédictions la plus surprenante de la relativité est la dilatation des durées. Un observateur qui compare l'écoulement du temps sur deux horloges, l'une fixe, l'autre en mouvement par rapport à lui, constate que cette dernière semble battre plus lentement. En d'autres termes, si l'on synchronise deux horloges identiques et que l'on envoie l'une d'elles faire un tour du monde aérien, l'horloge voyageuse aura perdu du temps à son retour par rapport à l'horloge « fixe », parce qu'elle s'est déplacée. Cet effet de dilatation a été prédit dès 1905 par Einstein, mais il a fallu attendre les années 1960 pour disposer d'horloges atomiques transportables permettant de vérifier concrètement son existence. On ne comptait plus les articles sur les différences entre des horloges en mouvement relatif, mais personne n'avait encore eu l'occasion de réaliser l'expérience : à la fin des années 1960, on n'avait jamais utilisé des *horloges* pour tester cette prédiction de la relativité. Cela ne veut pas dire que les physiciens rejetaient la dilatation des durées – elle avait été démontrée par de nombreuses expériences avec des rayons cosmiques et des accélérateurs de particules – mais, voyez-vous, Einstein lui-même avait parlé dans ses articles d'expériences avec des *horloges* et, plus de six décennies plus tard, on n'avait pas encore été en mesure de les réaliser.

Ce n'est pas tout : le décalage gravitationnel, lui aussi, attendait impatiemment d'être vérifié avec une horloge. Bien que prédit par Einstein dès 1907, il avait fallu attendre 1960 pour prouver expérimentalement que le temps s'écoule différemment – plus lentement – dans un champ de gravité plus intense. Une expérience particulièrement élégante fut menée par deux physiciens de l'université de Harvard, Robert Pound et Glen Rebka. Ils réussirent à mesurer la minuscule augmentation de fréquence de rayons gamma émis depuis le sommet d'une tour de 22,5 mètres de haut lorsqu'ils les détectaient à sa base (ainsi que l'effet opposé quand ils opéraient en sens

inverse). Dans une version améliorée en 1965, l'expérience avait obtenu un accord avec la prédiction d'Einstein à hauteur d'un pour cent – et on n'a pas fait mieux depuis en utilisant la même méthode. Bravo ! Mais ce n'est malgré tout pas aussi évocateur que de voir une horloge « de montagne » avancer sur une horloge « de plaine ».

C'est entendu : la relativité restreinte prédit que « des horloges en mouvement semblent battre plus lentement ». Toutefois, est-ce qu'une véritable horloge présenterait bien cet effet ? La relativité générale prédit que « les horloges plus élevées doivent battre plus vite », mais est-ce qu'une horloge transportée en montagne avancerait réellement sur une horloge demeurée dans la vallée ?

En octobre 1971, au cours d'une expérience unique, des chercheurs américains de l'Université de Saint-Louis et de l'USNO montrèrent enfin, à l'aide d'horloges atomiques, que les deux effets relativistes influaient bien sur leur comportement. Ils emportèrent quatre horloges à jet de césium à bord d'avions de ligne ordinaires, et leur firent faire le tour du monde, d'abord vers l'est en 41 heures au total, puis vers l'ouest en 49 heures. D'après la relativité, les horloges devaient être affectées par la dilatation des durées due à la vitesse des avions (on perd du temps), par le décalage gravitationnel dû à l'altitude des avions (on gagne du temps) et par l'effet Sagnac (perte de temps vers l'est, gain vers l'ouest). Tous calculs faits, on devait perdre 40 nanosecondes pour le voyage vers l'est et gagner 275 nanosecondes vers l'ouest. Les résultats furent en excellent accord : on mesura respectivement une perte de 59 nanosecondes et un gain de 273 nanosecondes, avec une erreur estimée à environ 20 nanosecondes. Cette expérience, dite de Hafele-Keating, d'après le nom des scientifiques qui la dirigèrent, est aujourd'hui un classique des ouvrages traitant de la relativité.

Néanmoins, en terme de précision sur le seul décalage gravitationnel, elle ne rivalisait pas avec celle de Pound et Rebka. Quatre ans plus tard, des scientifiques de l'université du Maryland (États-Unis) conçurent une expérience plus perfectionnée qui se concen-

trait sur l'effet de la gravitation. Ils préparèrent deux groupes identiques de six horloges atomiques, trois horloges HP 5061A à jet de césium et trois horloges au rubidium. Un groupe fut installé sur un avion de la marine américaine, et l'autre resta au sol. L'avion vola à cinq reprises entre septembre 1975 et janvier 1976, pour une durée totale de 15 heures, à la vitesse de 450 kilomètres par heure et à une altitude de 9 000 mètres. La trajectoire retenue formait un 8, dans le but d'éliminer l'influence de l'effet Sagnac ; la faible vitesse choisie permettait de réduire autant que possible la dilatation des durées. La position et la vitesse de l'avion étaient surveillées par radar tout au long du vol ; des informations horaires étaient aussi échangées par l'intermédiaire d'un laser installé au sol. Au cours d'un vol typique, on s'attendait à ce que les horloges « aéroportées » gagnent 52,8 nanosecondes du fait du décalage gravitationnel et en perdent 5,7 par dilatation des durées, soit un gain net prévu de 47,1 nanosecondes. La variation mesurée fut de 47 nanosecondes avec une marge d'erreur de 1,5 nanoseconde. Pas de doute : les horloges tournent plus vite en altitude, et du montant exact prévu !

Une confirmation plus spectaculaire encore du décalage gravitationnel vint en juin 1976 : un vaisseau spatial de la NASA du nom de *Gravity Probe A*<sup>27</sup> fut lancé à une altitude de 10 000 kilomètres avant de retomber vers le sol et de se disloquer dans l'atmosphère. Le vaisseau contenait une horloge à maser à hydrogène construite par les physiciens Robert Vessot et Martin Levine, de l'Observatoire astrophysique Smithsonian. Comme de bien entendu, les deux effets relativistes principaux y jouaient leur rôle : la dilatation des durées due à la vitesse de la fusée et le décalage gravitationnel dû à l'altitude importante. En suivant la vitesse de la fusée au cours de ce vol de 2 heures, les physiciens purent séparer clairement les deux effets ; ils montrèrent que, à l'altitude maximale atteinte par l'horloge, le décalage gravitationnel provoquait un

---

27. *Test de la gravitation A (N.d.T.)*.

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

battement plus rapide, d'environ 4 parties pour  $10^{10}$ , exactement comme prévu par la relativité. La précision de cette vérification avait atteint 70 parties par million.

S'il était encore nécessaire d'enfoncer le clou, des scientifiques japonais transportèrent en 1977 une horloge HP 5061A lors de deux voyages aller-retour entre les observatoires japonais de Mitaka et de Norikura, dont les altitudes diffèrent de 2 818 mètres. L'horloge séjourna une semaine à chaque endroit et, à la fin, on la compara à une horloge identique demeurée à Mitaka. Là encore la prédiction de la relativité fut validée.



56. John Davis, du NPL, prépare l'expédition d'une horloge atomique sur un vol Londres-Washington pour le compte d'une émission « Horizon » sur la relativité, préparée par la BBC.

La relativité générale fait une autre prédiction, peut-être plus évocatrice que celle du décalage gravitationnel : les objets massifs tels que le Soleil déforment l'espace qui les entoure. L'une des conséquences en est que, lorsqu'ils passent très près de la surface du Soleil, les rayons lumineux en provenance d'une étoile lointaine sont déviés par rapport à une trajectoire en ligne droite : l'étoile semble alors se déplacer dans le ciel. Cet effet a été observé pour la première fois lors d'une éclipse de Soleil en 1919, par une expédition emmenée par Sir Arthur Eddington. Elle a été confirmée à de nombreuses reprises, en particulier par la mesure précise des positions de quasars sources d'ondes radio<sup>28</sup>. Cette déviation des rayons lumineux par la matière s'accompagne d'un autre effet, auquel Einstein lui-même n'avait pas pensé : en passant près du Soleil, la lumière n'est pas seulement déviée, elle est aussi retardée. Il fallut attendre 1964 pour qu'un jeune physicien américain du MIT, Irwin Shapiro, calcule le retard d'un rayon lumineux frôlant le bord du Soleil, soit 125 microsecondes, retard par rapport à un rayon imaginaire qui parcourrait la même distance loin de tout corps massif.

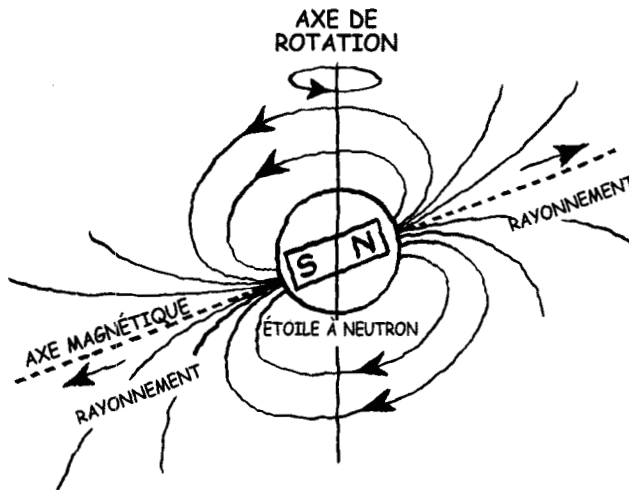
Dans le courant des années 1960 et au début des années 1970, les scientifiques, dont Shapiro lui-même, avaient entrepris de mesurer ce retard en faisant « rebondir » des ondes radar à la surface des planètes Mercure et Vénus, quand elles se trouvent de l'autre côté du Soleil. Ils avaient fait de même en échangeant des signaux radio avec des sondes interplanétaires – Mariner 6 et 7 – qui avaient survolé auparavant la planète Mars. Les résultats étaient encourageants, avec un accord à quelques pour cent entre mesures et prédictions. Une occasion encore plus favorable se profila avec le lancement par la NASA des deux sondes Viking vers Mars : celles-ci se posèrent à sa surface en 1976, mesurèrent la composition de l'atmosphère et du sol martiens et nous renvoyèrent de nombreux clichés. En novembre

---

<sup>28</sup>. Et aussi à l'aide du satellite Hipparcos de l'Agence Spatiale Européenne, qui mesura avec grande précision la position de 100 000 étoiles au début des années 1990 (N.d.T.).

de la même année, la trajectoire de Mars l'amena de l'autre côté du Soleil, vu de la Terre. En mesurant pendant plusieurs mois le temps nécessaire aux signaux radio pour faire l'aller-retour entre la Terre et les sondes Viking, Shapiro et ses collègues mesurèrent un retard de l'aller-retour frôlant la surface solaire – d'environ 250 microsecondes en accord avec la prédiction de la relativité générale, avec une incertitude réduite à 1 pour 1 000. Cette précision n'a pas été dépassée depuis lors.

En 1967, un nouveau test de la relativité a été rendu possible grâce à la découverte, par des radioastronomes de l'université de Cambridge, d'un objet extraordinaire qui émet des impulsions radio toutes les 1,337 seconde exactement. Il s'agissait du premier d'une longue liste de « pulsars », dont on comprit par la suite qu'il s'agissait d'astres compacts en rotation très rapide (*voir la figure 57*). Un pulsar est une étoile à neutron, cadavre d'une étoile massive qui a fini de brûler son carburant nucléaire avant de s'effondrer sur elle-



57. Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation – des résidus effondrés d'étoiles ayant achevé leur combustion. Ils émettent des faisceaux d'ondes radio à partir de zones proches de leurs pôles magnétiques.

même. Il tire son nom de son constituant principal, les neutrons, et est extrêmement dense : une masse de l'ordre de celle du Soleil dans une sphère de seulement 20 à 30 kilomètres de diamètre. Les pulsars les plus rapides effectuent plusieurs centaines de tours par seconde, alors qu'il faut quelques secondes aux plus lents (par comparaison, le Soleil tourne sur lui-même en 25 jours). Ils sont dotés d'un champ magnétique intense et émettent des faisceaux d'ondes radio dans la direction de leur axe des pôles magnétiques. Si, au cours de cette rotation, le faisceau balaie la Terre, nous voyons des impulsions d'ondes radio nous arriver périodiquement, comme le faisceau lumineux d'un phare. Ces impulsions sont tellement régulières, que les pulsars peuvent être utilisés comme des « horloges astrophysiques ».

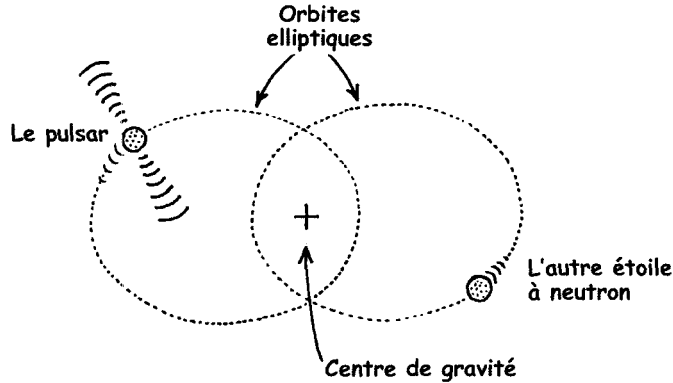
Le chronométrage de pulsars fait maintenant partie de la routine de nombreux observatoires. Les temps d'arrivée des impulsions sont enregistrés à l'aide d'horloges atomiques avec des précisions de quelques microsecondes : ces temps d'arrivée sont la matière première de nombreuses études astrophysiques. Si l'on fait des mesures sur plusieurs années – c'est-à-dire sur des milliards d'impulsions – les périodes de rotation peuvent être déterminées avec une précision de quelques parties pour  $10^{14}$ . Nous reviendrons au chapitre suivant sur les conséquences possibles de cette remarquable précision dans le domaine de la mesure du temps.

Conséquence immédiate de cette haute précision, les observations de pulsars sont très sensibles à l'effet Doppler. La vitesse de révolution de la Terre autour du Soleil, proche de 30 kilomètres par seconde, provoque de faibles variations périodiques de la fréquence avec laquelle les impulsions sont reçues : ces variations sautent aux yeux dans les listes de temps d'arrivée. Quand la Terre se déplace en direction du pulsar, les impulsions sont plus rapprochées que quand elle va en sens opposé. Les spécialistes des pulsars ont pris depuis longtemps l'habitude de corriger les listes de temps d'arrivée de ces effets de révolution de la Terre.



À l'été 1974, des astronomes américains ont découvert qu'un pulsar, PSR 1913+16, qui émet 17 impulsions par seconde, présentait un comportement bizarre, même une fois ces corrections effectuées. Le décalage Doppler des signaux semblait dû non seulement au mouvement de la Terre, mais aussi à celui du pulsar lui-même. Il s'avéra que celui-ci était en orbite autour d'un autre objet massif et sombre, probablement une autre étoile à neutron. Étant données leurs masses presque égales, il faudrait mieux dire que les deux astres tournent l'un autour de l'autre, sur des orbites très elliptiques, en un peu moins de 8 heures ; cette période est remarquablement courte quand on la compare aux 365 jours nécessaires à la Terre pour boucler une orbite. Grâce à leurs mesures soigneuses des temps d'arrivée des impulsions radio sur une période étendue, les astronomes furent en mesure de « cartographier » cette orbite avec une grande précision (voir la figure 58).

Cette orbite est loin d'être ordinaire ! Les deux astres sont si proches qu'au moment de leur plus grande proximité, on ne pourrait pas caser le Soleil entre eux deux. En conséquence, ils subissent



58. Le pulsar double PSR 1913+16 comprend deux étoiles à neutron tournant l'une autour de l'autre. Des mesures précises des impulsions radio émises par l'une des deux permettent aux astronomes de réaliser un nouveau test des théories de la relativité d'Einstein.

un champ de gravité très important, et la relativité prédit donc des effets mesurables, bien supérieurs à ceux que nous observons dans le système solaire. Ces effets ont été observés : le pulsar, avec sa grande régularité, est une horloge astrophysique soumise à la dilatation des durées, au décalage gravitationnel, et même à un autre effet concernant la forme de l'orbite. Au lieu de suivre de parfaites ellipses « képlériennes », l'orbite ne se referme pas sur elle-même ; il s'en faut de peu, et tout se passe comme si les astres suivaient des ellipses tournant lentement sur elles-mêmes – un phénomène de précession. L'orbite du pulsar tourne sur elle-même à la vitesse prédite par la relativité générale, qui est d'un tour en 85 ans.

Il y a un effet encore plus spectaculaire : l'orbite rétrécit. L'une des prédictions les plus baroques de la relativité générale est que certains objets rayonnent des ondes gravitationnelles, sortes de vaguelettes dans la structure même de l'espace-temps. Plus un système est « confiné », plus grand doit être le rayonnement et plus vite l'orbite rétrécira. Nous disposons là, avec le pulsar double, d'une horloge précise dans un tel système : plus les astres spiralent l'un vers l'autre, plus ils vont vite et plus l'orbite rétrécit. La relativité prédit que la durée d'une orbite doit diminuer de 75,8 microsecondes chaque année. Au début des années 1990, les observations avaient atteint une précision de 0,3 microseconde par an et la décroissance annuelle mesurée était de 76,0 microsecondes. Les deux étoiles à neutrons se rapprochent donc exactement comme on le prévoit à partir de l'énergie émise en principe sous forme d'ondes gravitationnelles. À ce rythme, on estime qu'elles se rapprocheront tellement qu'elles fusionneront en un seul objet d'ici 300 millions d'années.

À ce jour, aucun terrien n'a observé directement des ondes gravitationnelles, et ce n'est pas faute d'avoir essayé<sup>29</sup>. Cependant,

---

*29. La mise en service progressive, à partir de 2002, de détecteurs extraordinairement sensibles, LIGO aux États-Unis, Virgo, fruit d'une collaboration italo-française, ainsi que quelques autres, en Allemagne et au Japon notamment, rendra peut-être cette affirmation caduque (N.d.T.).*

les indications extraites de l'analyse des impulsions du pulsar double sont si convaincantes que ses découvreurs, Russell Hulse et Joe Taylor, ont reçu le prix Nobel de physique en 1993. Tout cela simplement grâce à la mesure précise des temps d'arrivée d'impulsions radio tombant du ciel...

### **Mille et un usages des horloges atomiques**

Il existe d'autres utilisations, plus généralistes, d'un temps précis. On peut les diviser en deux types : celles où il est nécessaire de connaître le temps ou bien la fréquence avec une précision extrême, et le cas particulier où l'on utilise des satellites de navigation pour connaître précisément sa position sur la Terre. Nous consacrons une section entière à cette dernière utilisation en plein essor. Avant cela, examinons des applications directes de l'existence d'un temps précis.

L'utilisation la plus simple est non pas la distribution d'une *heure* précise, mais celle d'une *fréquence* extrêmement bien définie. Les fabricants d'équipements électroniques, par exemple, ont besoin d'une source de fréquence précise et stable, telle qu'une horloge au césium ; ils s'en servent pour étalonner leurs produits. Parmi les stations radio qui émettent des signaux horaires, plusieurs ont une fréquence d'émission elle-même précisément définie : on les utilise comme étalons de fréquence. L'un des émetteurs les plus stables au monde est le DCF77, qui émet à une fréquence de 77,5 kilohertz sous le contrôle du PTB de Brunswick. Cette fréquence d'émission, support par ailleurs de signaux horaires, atteint une précision de 5 parties pour  $10^{13}$ , à condition de la moyennner sur une dizaine de jours.

Quand on s'occupe de mesurer le temps plutôt que la fréquence, il faut distinguer intervalles de temps et échelles de temps. Les intervalles de temps sont très importants lors de compétitions sportives. Dans une course de 100 mètres par exemple, la vitesse des meilleurs sprinters dépasse 10 mètres par seconde. Deux coureurs

séparés par un centimètre franchiront la ligne d'arrivée avec une milliseconde d'écart : une mesure précise du temps est indispensable. Toutefois, cette durée de la course n'est pas une heure, c'est un intervalle de temps : personne ne s'intéressera à l'heure UTC exacte à laquelle le coureur X a franchi la ligne (d'ailleurs cela ne requiert nullement une horloge atomique).

Toutefois, il existe des cas où un intervalle de temps doit être mesuré avec une précision extrême que seule une horloge atomique peut atteindre. L'intensité de la gravité terrestre, par exemple, peut être mesurée à l'aide d'un instrument appelé gravimètre. Son principe est extrêmement simple : on fait tomber une petite masse d'une hauteur donnée, et le temps de chute est mesuré avec une horloge au rubidium. En pratique, la hauteur est de 20 centimètres et le temps de chute de deux dixièmes de seconde, temps que l'on peut mesurer avec une précision d'un dixième de nanoseconde. Cette incertitude correspond à une distance plus petite que le diamètre d'un atome d'hydrogène, et on en déduit une mesure de la gravité terrestre avec une précision relative d'une à deux parties par milliard. Là encore, peu importe l'heure UTC : seule compte la durée de la chute.

On a parfois besoin de durées précises pour mesurer des distances. Vous vous souvenez des réflecteurs laser déposés sur la Lune, que nous avons vus au chapitre 5 ? La distance de la Lune est mesurée par l'intervalle de temps de l'aller-retour Terre-Lune effectué par une impulsion de lumière laser. En connaissant la vitesse de la lumière, le calcul de la distance ne pose pas de problème. La précision atteint aujourd'hui 3 centimètres, ce qui équivaut à une précision de 0,2 nanoseconde sur le temps d'aller-retour. Sur le même principe, le champ de gravité de la Terre peut être entièrement cartographié par le suivi de satellites équipés eux aussi de réflecteurs laser (*voir le chapitre 4*). Ces mesures dépendent également de la détermination précise d'un intervalle de temps de parcours aller-retour d'impulsions laser, toujours avec des horloges atomiques. Les

géophysiciens en déduisent la distribution de masse au sein de la Terre. Les mesures radar fonctionnent de la même façon, par l'émission d'ondes radio qui sont ensuite renvoyées par la surface de l'objet visé, par exemple un avion. Ces impulsions voyagent à la vitesse de la lumière. La mesure de la durée d'un aller-retour indique la distance de l'avion : si l'on veut connaître la distance de l'avion à 1,5 mètre près, il faut disposer d'une mesure de temps précise à 10 nanosecondes.

Un incident sur une ligne électrique à haute tension peut provoquer, par précaution, une interruption automatique de la transmission d'électricité par des coupe-circuit. Il faut savoir d'où vient le problème pour y remédier, de préférence le plus vite possible. Les signaux électriques voyagent à une vitesse proche de celle de la lumière ; quand la ligne est coupée, le centre de contrôle s'en rend compte instantanément. Toutefois, la localisation du problème n'est pas si simple. Prenons l'exemple d'une section de ligne électrique de 30 kilomètres de long, de telle sorte qu'un signal met 0,1 milliseconde (100 microsecondes) pour la parcourir. Si l'interruption est localisée au milieu de la section, l'information arrivera simultanément aux deux extrémités de la section, 50 microsecondes plus tard. Si elle se trouve plus proche d'une des extrémités, celle-ci recevra l'information un peu plus tôt que l'autre. Une compagnie d'électricité capable de mesurer la différence de temps d'arrivée de l'information qu'une coupure est survenue, avec une précision d'une microseconde localisera le problème à 300 mètres près ; normalement, cela suffit à identifier le pylône concerné.

Le Bureau Météorologique du Royaume-Uni a installé un système de capteurs pour connaître la localisation des coups de foudre. Un réseau de récepteurs radio détecte les impulsions d'ondes radio émises par un éclair ; en mesurant les temps d'arrivée sur les récepteurs, la position du coup de foudre peut être calculée par triangulation.

Les tremblements de terre sont détectés par des stations de sismographes disséminés sur toute la surface de la planète. Quand un

tremblement de terre se produit, des ondes sismiques se propagent dans la Terre vers toutes les directions. Des mesures précises des temps d'arrivée des ondes dans chaque station permettent aux sismologues de localiser l'origine du tremblement de terre. La même méthode est utilisée pour détecter des explosions de têtes nucléaires.

Dans tous les cas que nous venons de citer, il suffit en principe de mesurer des intervalles de temps ; en pratique, il est souvent plus commode d'assigner un instant – on dit aussi une époque – à chaque événement, c'est-à-dire l'instant où il s'est produit dans une certaine échelle de temps. Cela est d'autant plus utile que l'on souhaite comparer des événements enregistrés en des endroits très éloignés. Dans le cas des ondes sismiques par exemple, les stations enregistrent les heures UTC d'arrivée des diverses ondes ; par la suite, ces heures mesurées en de nombreuses stations sont combinées pour calculer les temps de parcours des ondes, et l'on en déduit la localisation du tremblement de terre.

### **La synchronisation**

Dans de nombreuses applications, il ne suffit pas de connaître l'intervalle de temps entre des événements, mais bien l'heure UTC à laquelle ils se sont produits. Dans ce cas, l'heure absolue – l'époque – est essentielle, car des événements différents doivent être synchronisés entre eux, ainsi qu'avec le monde extérieur.

Les modestes horloges de gare en donnent un exemple simple (*voir la figure 59*). Il en existe des milliers en tous points d'un réseau de chemin de fer : toutes doivent donner la même heure si l'on souhaite que les trains circulent en toute sécurité et efficacité. Cela ne suffit pas ; il serait préférable que leur heure s'accorde avec celle des clients, faute de quoi les horaires officiels seraient de peu d'utilité. Comment procède-t-on ? Les compagnies de chemin de fer pourraient choisir de se procurer une bonne horloge « maîtresse », maintenue proche de l'UTC, et distribuer à partir de là des signaux horaires à toutes les autres horloges. En fait, cela revient moins cher

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

d'acheter des horloges radio-pilotées à partir d'un service horaire UTC, tel que ceux de MSF ou de DCF77. Les réseaux de chemin de fer n'ont absolument pas *besoin* de la précision d'une milliseconde fournie par ces émetteurs ; l'important pour eux est que toutes leurs horloges soient asservies sur cette source commune d'une précision garantie : cela les affranchit de la corvée de leur synchronisation mutuelle et avec le monde extérieur.

Une précision d'une seconde suffit largement à la circulation des trains, mais d'autres réseaux ont des exigences bien supérieures : les réseaux de communication numériques. Depuis les années 1970, les réseaux téléphoniques ont basculé dans l'ère des transmissions numériques, avec des signaux voyageant sous forme de trains d'impulsions, que ce soit par câble ou par liaison micro-onde. La même méthode est utilisée pour les communications entre ordinateurs, bases de l'Internet. Une condition indispensable au succès d'une



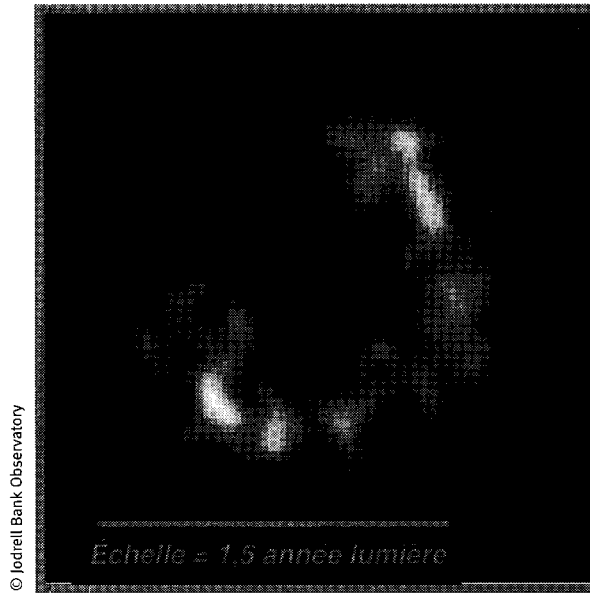
© Crown Copyright 2000. Avec l'autorisation du contrôleur de l'HMSO

59. Les horloges de gare telles que celle-ci sont contrôlées directement par les signaux radio transmis par l'émetteur MSF.

communication est la parfaite synchronisation des trains d'impulsions : en effet, le taux d'émission des impulsions doit être parfaitement adapté à leur taux de réception. Cela requiert une parfaite synchronisation de l'ensemble du réseau. Pour le contrôle d'un réseau de chemin de fer, les heures de passage des trains sont calculées pour éviter à tout prix que deux trains différents empruntent la même voie au même moment. De même, les trains d'impulsions sont envoyés sur le réseau à des intervalles de temps déterminés par une horloge précise. Plus les informations qui circulent sur le réseau sont nombreuses, plus précise doit être la synchronisation de ces circulations. L'Union Internationale des Télécommunications recommande une synchronisation des réseaux avec une précision d'une partie pour 100 milliards, l'équivalent d'un décalage d'une seconde au bout de 3 000 ans. Au Royaume-Uni, *British Telecom* vient d'installer un nouveau système horaire pour ses réseaux numériques. La source de l'UTC y est le système GPS, avec le renfort de deux horloges atomiques au césium.

Quand ils veulent réaliser des observations avec la meilleure précision spatiale possible, les radioastronomes s'appuient sur des horloges atomiques. Dans la technique d'interférométrie à très grande base (*VLBI*, voir le chapitre 5), on combine des observations obtenues simultanément par de nombreux radiotélescopes très éloignés : le résultat est analogue en terme de finesse d'image à ce qu'on obtiendrait d'un radiotélescope ayant la taille de la Terre. La clef d'une telle combinaison, est d'enregistrer les signaux radio sur bande magnétique dans chacun des observatoires, simultanément avec des tops horaires très précis. Ces tops horaires sont fournis par des horloges atomiques locales de type maser à hydrogène : ils permettent ultérieurement de synchroniser les observations faites en tout point de la planète. Cette technique de VLBI est utilisée pour obtenir des cartes extrêmement détaillées de certains objets astronomiques, mais aussi pour mesurer les variations de l'orientation de la Terre dans l'espace, ou bien la dérive des continents (voir la figure 60).





60. Une synchronisation très poussée entre télescopes est nécessaire pour la technique de radio-astronomie dite d'interférométrie à très grande base (VLBI). Cette image d'une ancienne explosion d'étoile, dans la galaxie M82, située à 10 millions d'années-lumière, a été obtenue en combinant les observations simultanées de 20 radio-télescopes situés en Europe et en Amérique du Nord, en novembre 1998. La finesse d'image obtenue est 30 fois supérieure à celle que permet le télescope spatial Hubble.

### Les mesures de position

S'il est un domaine d'applications des mesures de temps qui est en pleine expansion, c'est bien celui des mesures de position à la surface de la Terre à l'aide des systèmes de navigation par satellite GPS et GLONASS. Celles-ci nécessitent l'emploi d'un récepteur spécial qui capte les signaux des satellites situés en vue directe (il y en a usuellement cinq, quelquefois plus) ; le récepteur en déduit par calcul la latitude, la longitude et l'altitude où il se trouve. Même les plus simples de ces récepteurs sont capables de mesurer la position horizontale (c'est-à-dire à la surface de la Terre) avec une précision

supérieure à une centaine de mètres ; cette précision est déterminée par la stabilité et l'exactitude de l'échelle de temps du système GPS.

Il est néanmoins possible d'obtenir, à partir du même signal, une précision supérieure en utilisant les méthodes dites « différentielles ». Elles utilisent un certain nombre de stations de référence, fixes et dont les positions sont bien connues, qui suivent les signaux GPS et en déduisent des corrections utilisables par les récepteurs GPS situés dans la même région<sup>30</sup>. Ces méthodes différentielles ont un avantage : elles permettent de s'affranchir du brouillage volontaire des signaux GPS destinés aux civils (brouillage aujourd'hui supprimé) ; cela conduit à une meilleure précision, de l'ordre de quelques mètres. Il existe même des techniques encore plus perfectionnées permettant d'atteindre quelques centimètres.

Le GPS a d'abord été développé à des fins militaires, mais ses applications civiles dépassent de loin aujourd'hui tout ce qu'on pouvait imaginer au début. Il y a d'abord les utilisations « évidentes » : la localisation des bateaux, des avions et des vaisseaux spatiaux. Cette méthode de localisation est tellement facile d'accès qu'elle a remplacé les autres méthodes de positionnement.

Imaginez que vous ne soyez pas un génie des cartes routières consultées « en temps réel » ; il vous suffit aujourd'hui d'acheter un système basé sur le GPS qui localise directement votre véhicule sur une carte routière informatisée. Si votre voiture (ou l'équipement de navigation GPS dont elle est pourvue) est haut de gamme, vous pouvez aussi envisager de l'équiper d'une petite boîte noire discrète qui calcule et émet par radio sa position, ce qui s'avère utile dans le cas où votre voiture est volée. On trouve sur le marché des dispositifs GPS remplaçant les tachygraphes de camion, voire les compteurs de taxi ! Les opérateurs de salle de contrôle de moyens de secours – police, pompiers, etc. – peuvent aujourd'hui utiliser le

---

30. On les appelle méthodes différentielles car elles fonctionnent par écart, ou différence, entre la position de ces stations de référence et le récepteur GPS mobile (N.d.T.).

GPS pour savoir exactement où sont leurs véhicules d'intervention et expédier les plus proches sur les lieux d'un accident. Aux arrêts de bus, certains des affichages indiquant le délai d'attente du prochain bus fonctionnent aussi avec l'aide du GPS<sup>31</sup>. Il existe aussi des systèmes analogues de localisation des trains. Les randonneurs équipés de récepteurs GPS ne peuvent pratiquement plus se perdre en montagne. Tel un chien d'aveugle électronique, un ordinateur miniaturisé indiquerait à ses porteurs où ils se trouvent, ou bien la direction à prendre pour rejoindre un point donné : « Stop ! Le bureau de poste est sur votre droite. »

Vous voyez qu'avec un peu d'imagination, on trouve rapidement une nouvelle application directe du GPS ; d'autres sont moins évidentes. Au chapitre 5, nous avons vu que le GPS est utilisé quotidiennement pour connaître l'orientation de la Terre, ce qui permet de mesurer les minuscules variations de la durée du jour et de suivre les oscillations des pôles géographiques. On utilise aussi le GPS pour mesurer avec précision la hauteur des océans (le satellite franco-américain Topex-Poséidon a joué là un rôle pionnier), et même l'écartement des diverses plaques terrestres – la fameuse dérive des continents – ou les mouvements de l'écorce dans des zones fortement sismiques. Les géographes s'en servent pour connaître la position exacte d'une frontière dans des terrains sans point de repère, les géologues pour des relevés hydrographiques ou pour la prospection minière. J'ai même entendu dire qu'on s'en est servi pour tracer les limites de terrains de sport ! Aujourd'hui certains agriculteurs l'utilisent pour la culture de très grands champs : ils contrôlent la répartition des engrais à l'échelle de quelques mètres au lieu de les disperser sans discernement sur toute la zone. Dans la région des États-Unis dénommée « ceinture du maïs », des moissonneuses robotisées dirigées via le GPS parcourent les prairies pour récolter

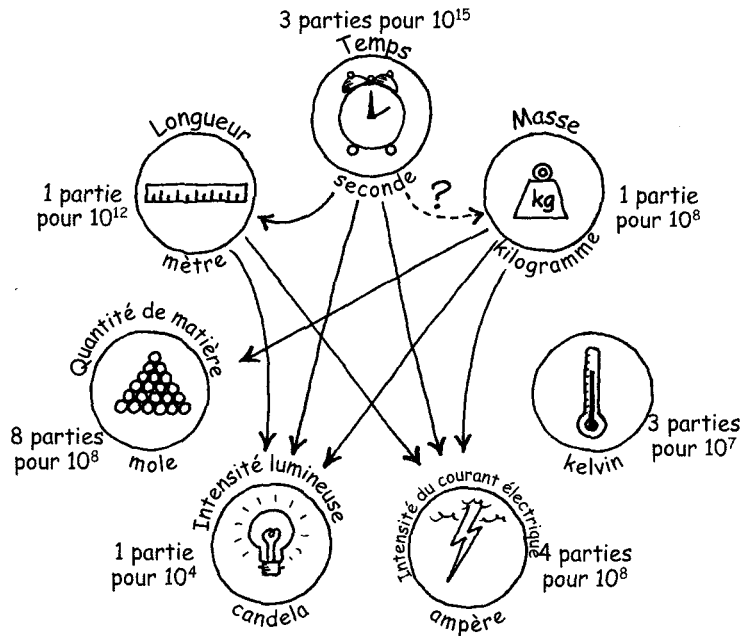
---

31. La première ligne équipée à Paris était la ligne de bus 47 de la RATP ; l'équipement progressif de toutes les lignes répond surtout à des exigences de sécurité (N.d.T.).

les épis pendant que le fermier s'occupe d'autre chose. On est sûrement encore loin d'avoir épuisé toutes les possibilités qu'offre cette utilisation spécifique d'une heure extrêmement précise.

### De nouvelles unités de mesure

Le sujet de ce livre est la mesure du temps et de son unité, la seconde. Cependant, la seconde n'est qu'une des sept grandeurs fondamentales qui permettent de construire le Système International d'unités (SI). Les six autres sont le mètre, unité de longueur ; le kilogramme, unité de masse ; l'ampère, unité d'intensité du courant électrique ; le kelvin, unité de température ; la candela, unité d'intensité lumineuse ; et la mole, unité de « quantité de



61. Les sept unités du Système International SI, leur précision et leurs relations. Le point d'interrogation indique les efforts menés pour redéfinir le kilogramme en terme de secondes. Si on y arrive, six des sept unités de base se retrouveraient reliées à la fréquence de transition de l'atome de césium.

matière ». Les combinaisons de toutes ces unités de base permettent de construire d'autres unités, dites dérivées, et de mesurer ainsi n'importe quelle grandeur physique. La figure 61 indique comment ces unités sont reliées, et la précision qu'elles ont atteinte aujourd'hui. Des sept unités, la seconde se détache nettement en ce qui concerne la précision, ce qui explique pourquoi nous pouvons mesurer le temps avec une telle exactitude. À l'autre bout de l'échelle, on trouve la température, avec trois parties pour dix millions, et l'intensité lumineuse, avec seulement une partie pour dix mille. Depuis quelque temps, on tente de relier les autres unités de base à la seconde dans le but de profiter de sa grande précision.

Chacune des unités fondamentales a sa propre définition précise, que nous n'allons pas donner ici ; trois d'entre elles dépendent directement de la définition de la seconde, le mètre, l'ampère et la candela (bien que les deux dernières dépendent aussi du kilogramme). Le mètre, lui, ne dépend plus que de la seconde.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé que le mètre avait été défini comme la distance entre deux encoches sur une barre métallique conservée au BIPM à Paris, le mètre étalon. Des mesures étalées sur de nombreuses années avaient montré que cette distance était stable à environ trois parties pour dix millions ; dans les années 1950, la précision des techniques de mesure avait déjà dépassé cette valeur. Dans le même esprit qui prévalut lors de la redéfinition de la seconde en terme de la transition du césium, la CGPM décida, en 1960, de redéfinir le mètre à partir d'une émission lumineuse d'un certain atome, plus précisément 1 650 763,73 fois la longueur d'onde dans le vide d'une raie rouge-orangée du spectre de l'atome de krypton 86.

En 1983, cette définition fut abandonnée, et l'histoire est instructive. Les mesures de la vitesse de la lumière dans le vide avaient atteint une telle précision qu'elles en devenaient plus précises que le mètre lui-même. Une mesure effectuée en 1972 avait donné 299 792 458 mètres par seconde, avec une précision de qua-

tre parties pour un milliard ; cette incertitude sur la mesure était presque due entièrement à la difficulté à utiliser la lampe à krypton comme source de l'étalon de longueur. La décision fut alors prise de « renverser la vapeur » et de définir au contraire le mètre en fonction de la vitesse de la lumière. Ainsi, depuis 1983, le mètre est « la distance parcourue dans le vide par la lumière dans un intervalle de temps de  $1/299\,792\,458^e$  de seconde ». Conséquence curieuse de cette définition : il n'est plus possible de mesurer la vitesse de la lumière ; elle est définitivement fixée pour l'éternité à la valeur de 299 792 458 mètres par seconde<sup>32</sup>.

Il y a plus important : cette définition de 1983 garantit que le mètre peut être, du moins en principe, réalisé avec la même précision que la seconde. L'incertitude actuelle sur la durée de celle-ci s'approche d'une partie pour  $10^{15}$ , et seules les limitations techniques empêchent le mètre d'atteindre effectivement cette même précision. Dans la pratique, comme nous le verrons au prochain chapitre, les distances peuvent aujourd'hui être mesurées à environ quelques parties pour  $10^{11}$ , soit 100 fois mieux qu'il y a 20 ans.

L'élégance, et le succès, de cette nouvelle définition a donné du grain à moudre aux métrologistes – les physiciens qui se penchent sur tous ces problèmes de mesures précises et de définitions des unités. Pourquoi ne pas tenter de définir aussi le kilogramme en terme de constantes fondamentales de la Nature ? La définition en vigueur aujourd'hui est toujours la même qu'il y a bien longtemps : la masse du prototype international, un cylindre de platine iridié conservé – avec un grand luxe de précautions – au BIPM. Il en existe des répliques, les prototypes nationaux, conservés dans les divers laboratoires nationaux de métrologie (*voir la figure 9*). Cette définition n'est pas très satisfaisante, car elle dépend non pas d'une constante de la Nature, mais de la masse d'un artefact, un morceau de

---

32. *Humour anglais, car cette éternité pourrait prendre fin si l'on choisissait une nouvelle définition de la seconde ou du mètre (N.d.T.).*

métal, dont rien ne prouve qu'il ne change pas au cours des ans. De fait, les mesures des prototypes nationaux montrent que leur masse s'accroît chaque année d'un microgramme environ, probablement par quelque contamination à partir de l'atmosphère. La dernière fois que des prototypes nationaux ont été comparés à celui du BIPM, en 1993, leurs masses s'étendaient sur une plage d'environ 100 microgrammes ! Voilà de bonnes raisons de considérer la définition actuelle comme tout juste satisfaisante, à hauteur d'une partie pour 100 millions.

Pour arriver à une nouvelle définition, deux techniques concurrentes sont à l'étude. Chacune requiert que l'une des constantes physiques fondamentales soit fixée, de la même manière que la vitesse de la lumière s'est retrouvée fixée par la définition du mètre. La première possibilité serait de définir le kilogramme comme la masse d'un nombre donné d'atomes spécifiques, en général du carbone. L'une des propositions correspondantes énonce que « Le kilogramme est la masse de  $5,018 \times 10^{25}$  atomes de carbone 12 libres, au repos, dans leur état fondamental. » Cela reviendrait à fixer la « constante d'Avogadro » (souvent appelée le nombre d'Avogadro), un nombre qui relie le nombre d'atomes d'un objet à sa masse. La valeur officielle de cette constante est connue avec une précision de 6 parties pour 10 millions<sup>33</sup>, et la redéfinition du kilogramme supposerait donc une amélioration substantielle de cette incertitude. En ce moment même, les recherches expérimentales menées par une collaboration internationale visent à utiliser des techniques « dernier cri » pour compter le nombre d'atomes de silicium présents dans une sphère fabriquée pour les besoins de la cause, et dont la masse est extrêmement proche de celle du kilogramme étalon. Si vous avez déjà participé à un concours du style « combien y a-t-il exactement de bonbons dans ce pot ? », vous saisissez tout de suite de quoi il s'agit, sauf qu'ici les organisateurs du concours ne connaissent pas eux-mêmes le résultat.

---

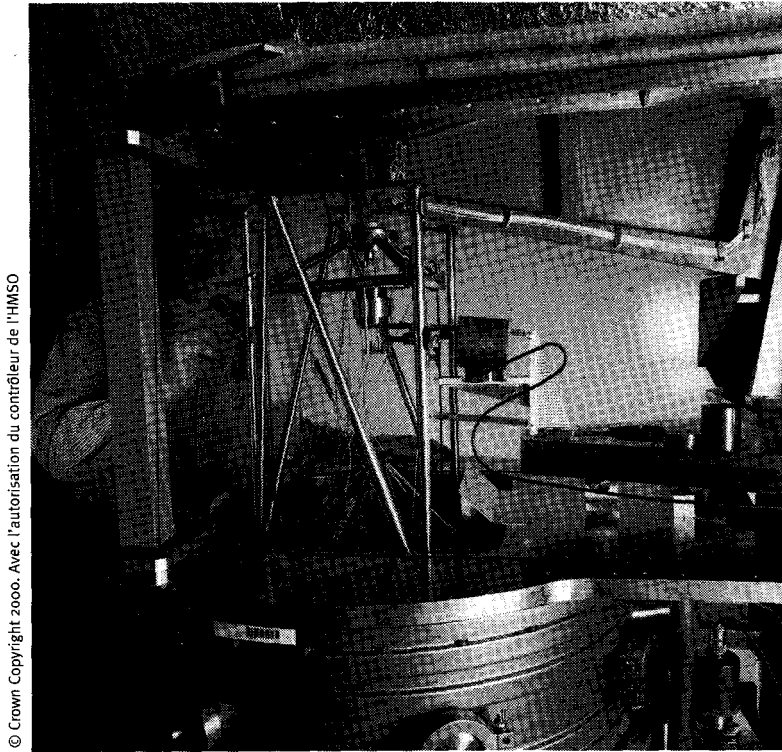
33. Valeur récemment améliorée à 8 parties pour 100 millions (N.d.T.).

La deuxième approche – peut-être se révélera-t-elle la plus comode – consiste à redéfinir le kilogramme en terme d'une fréquence. La conséquence la plus connue de la relativité d'Einstein est que toute énergie correspond à une masse. C'est la fameuse formule  $E = mc^2$ , qui nous dit quelle énergie  $E$  est associée à une masse  $m$  ( $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide). Au chapitre 2, nous avons vu qu'un photon, grain de lumière, est doté d'une énergie proportionnelle à sa fréquence. En principe, ces deux relations de proportionnalité permettraient de relier la masse et la fréquence, à travers deux constantes fondamentales, la vitesse de la lumière et la constante de Planck. Par l'intermédiaire de ces deux formules, on pourrait définir le kilogramme comme un multiple de la masse correspondant à une fréquence de transition donnée. Comme la fréquence est le nombre de cycles dans une seconde, cela reviendrait à définir le kilogramme par rapport à la seconde. On pourrait aussi relier le kilogramme à la masse associée à la somme des fréquences de nombreux photons (notez que l'on n'a pas besoin de s'intéresser, en principe, à la fréquence de chaque photon ; il suffit de connaître la somme de toutes leurs fréquences). L'une des définitions proposées est donc : « Le kilogramme est la masse d'un corps au repos dont l'énergie équivalente est égale à celle de photons dont la somme des fréquences vaut  $135\,639\,274 \times 10^{42}$  hertz. »

Si cette deuxième approche prévaut, c'est la constante de Planck qui se retrouvera fixée, celle qui relie la fréquence d'un photon à son énergie. Cette constante est la quantité fondamentale de la physique quantique, et sa valeur officielle est connue avec une précision d'environ une partie pour dix millions. Des expériences sont en cours, au NIST et au NPL entre autres, pour tenter de réduire cette incertitude d'un facteur 100, à une partie par milliard (voir la figure 62). C'est à cette condition que la définition proposée ci-dessus deviendrait très intéressante.

Si les métrologistes choisissent d'emprunter la route de la fréquence pour redéfinir le kilogramme, alors les trois unités les plus courantes se retrouveront toutes définies en fonction de la fréquence





62. Cet appareillage – une balance de Watt – est utilisé au NPL dans le cadre d'une série d'expériences visant à redéfinir le kilogramme par rapport à la fréquence de transition du césium.

de transition du césium. Comme on peut le voir dans la figure 60, ces trois unités en définissent trois autres de manière unique, l'ampère, la mole et la candela ; on peut ainsi espérer que ces trois unités bénéficieraient, elles aussi, d'une précision accrue. Il ne resterait alors plus qu'une unité – celle de température, le kelvin – à demeurer totalement imperméable à l'influence envahissante du temps.

# 8

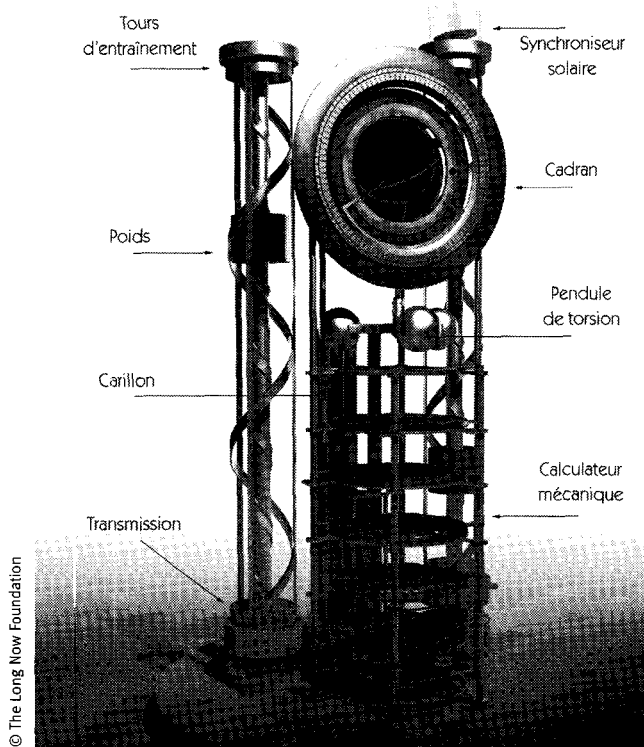
## L'avenir du temps

Où va le temps, aujourd'hui ? Eh bien, cela dépend à quel horizon l'on regarde. Le plus lointain que je connaisse, c'est celui de la fondation *Long Now*, un groupe d'enthousiastes persuadés que notre préoccupation pour l'« ici et maintenant » est responsable de notre manque de perspective sur l'échelle du temps. Ils souhaitent l'élargir par la construction d'une horloge monumentale destinée à durer au moins 10 000 ans. Danny Hillis, l'informaticien américain qui a lancé ce projet, la conçoit comme une horloge qui « ferait un tic-tac par an, sonnerait tous les siècles, et dont le coucou sortirait de sa boîte tous les millénaires ».

### **Le projet *Long Now***

Ni vous ni moi ne pouvons prédire où en sera l'humanité d'ici dix millénaires. Les concepteurs de l'horloge en déduisent qu'il ne faut pas faire d'hypothèses trop optimistes sur les capacités techniques de nos descendants. Leur règle d'or est que la maintenance de l'horloge ne doit pas dépasser la technologie connue à l'âge de bronze ; évidemment, cela ne favorise pas tellement les horloges à césium. Toutes les parties de l'horloge seront donc mécaniques, avec un oscillateur mécanique fournissant la fréquence de référence, et une sorte d'ordinateur mécanique chargé de compter les cycles (voir la figure 63). Un étalonnage périodique est prévu par comparaison avec la culmination du Soleil, le « midi » solaire.

## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?



63. L'un des concepts possibles de l'horloge *Long Now*, prévue pour fonctionner 10 000 ans. Un prototype en modèle réduit a été réalisé juste à temps pour sonner l'heure du troisième millénaire.

Avec sa précision prévue d'un jour tous les 2 000 ans, cette horloge ne concurrencera pas sérieusement les horloges atomiques, mais tel n'est pas son objectif. L'idée est plutôt de disposer d'une horloge capable de battre bien après que les horloges atomiques du NPL auront rejoint les fossiles dans les sédiments du bassin de la Tamise.

Ce chapitre est consacré à un horizon bien plus proche, celui des décennies à venir. Les successeurs des étalons à jet de césium – qui ont été les chevaux de trait du temps atomique depuis plus de

40 ans – sont déjà sur la ligne de départ. Rien ne dit qu'ils ne seront pas à leur tour dépassés par des techniques entièrement nouvelles en cours de développement dans de nombreux laboratoires. Et, qui sait, des changements de l'UTC lui-même sont également possibles. Commençons par l'avenir immédiat, celui des étalons primaires.

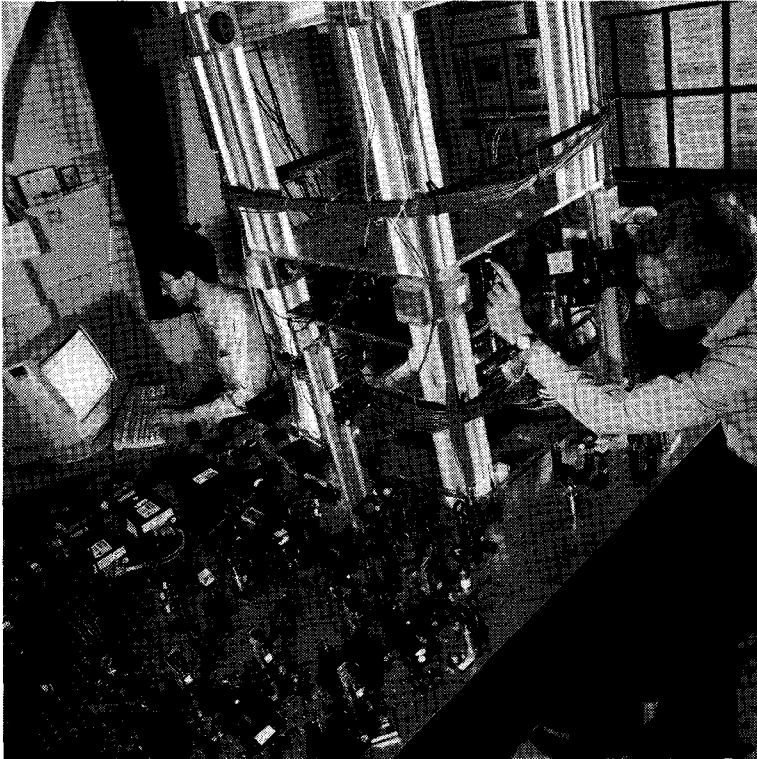
### **Les fontaines à césium**

Nous avons déjà évoqué la première fontaine à césium au monde, celle du LPTF à Paris (*voir la figure 31*) : elle est la première d'une lignée qui permettra une amélioration de la précision d'un facteur 10 à 100 par rapport à celle des étalons à césium existants. Pratiquement chacun des sept laboratoires détenteurs d'un des étalons primaires à césium (*voir la figure 26*) travaille sur une fontaine à césium, sans compter les autres laboratoires de métrologie qui se sont joints à la course. Une seconde fontaine est maintenant opérationnelle au NIST, et il est probable que, d'ici quelques années, on trouvera des fontaines à césium dans huit à dix laboratoires tout autour du Globe. Inutile de dire que cet accroissement du nombre – et de la précision – des étalons primaires sera le bienvenu !

Le NPL, où Louis Essen et Jack Parry construisirent en 1955 le premier étalon à césium opérationnel, est l'un des laboratoires engagés dans la réalisation des fontaines à césium. Une fontaine expérimentale est en cours d'essais dans une ancienne cave à bière de Bushy House, la demeure du XVII<sup>e</sup> siècle qui fut le premier siège du NPL (*voir la figure 64*). Au début du XX<sup>e</sup> siècle, cette même cave avait été utilisée pour y tester des montres et des chronomètres : elle était probablement prédestinée à devenir l'autel du développement des « chronomètres » du XXI<sup>e</sup> siècle.

Vous vous souvenez peut-être (*voir le chapitre 4*) que les atomes de césium d'une telle fontaine reçoivent une pichenette qui les expédie gentiment à un mètre de hauteur ; ils retombent ensuite sous l'influence de la gravité. Au cours de ce périple, ils traversent deux fois une cavité où ils sont exposés à un faisceau de micro-ondes,

© Crown Copyright 2000. Avec l'autorisation du contrôleur de l'HMSO



64. Peter Whibberley (à gauche) et Dale Henderson travaillent sur la fontaine à césium expérimentale du NPL. La fontaine proprement dite est située dans le cadre rectangulaire au-dessus du centre de l'image ; le banc optique en bas à gauche sert à la préparation des faisceaux laser. Cette pièce fut utilisée par le passé pour étalonner des chronomètres de marine.

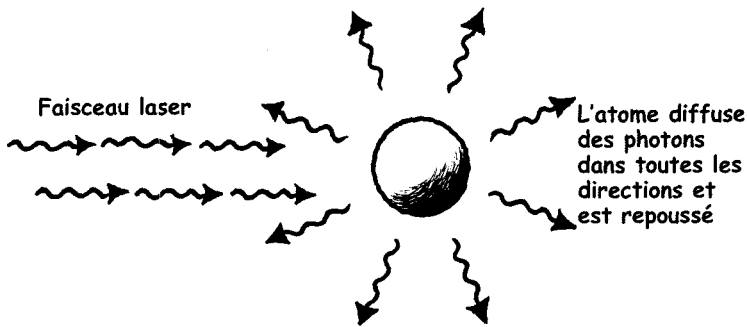
une fois vers le haut, une fois vers le bas. Si les micro-ondes sont accordées sur la fréquence de la transition hyperfine du césium, les atomes basculent d'un état hyperfin dans l'autre. Ici, la clef du succès est de disposer d'un nombre suffisant d'atomes lents. Si l'on veut que les atomes grimpent d'un mètre, il faut les lancer vers le haut avec une vitesse d'environ 4,5 mètres par seconde (16 kilomètres par heure) ; avant cela, il est nécessaire de les avoir ralentis à des vitesses de l'ordre de quelques centimètres par seconde, comme nous

allons le voir. Dans un étalon à césium typique, les atomes émergent du four à 200 mètres par seconde : comment arrive-t-on à les ralentir autant ? La méthode utilisée est la base non seulement des fontaines à césium, mais aussi d'horloges atomiques d'un nouveau type.

Au chapitre 2, nous avons vu que les atomes peuvent absorber des photons, à condition que l'énergie de ces photons soit précisément égale à celle nécessaire pour qu'un des électrons de l'atome change de niveau. Le césium, en particulier, peut absorber des photons ayant une longueur d'onde de 852 nanomètres, un rayonnement du proche infrarouge, invisible à l'œil humain. L'une des innovations techniques ayant rendu ces études possibles a été la fabrication de lasers fiables et réglables fonctionnant à cette longueur d'onde – des lasers du même type sont utilisés dans les lecteurs de disques compacts.

Quand on expose un atome de césium à cette lumière de 852 nanomètres, il absorbe un photon et le ré-émet quasi instantanément, un peu comme si le photon avait rebondi sur l'atome. Ce processus est d'ailleurs connu sous le nom de « diffusion de la lumière ». Quand l'atome absorbe le photon, il reçoit une petite impulsion dirigée dans le sens de déplacement du photon. Quand il ré-émet le photon, l'atome va de même reculer dans la direction opposée à celle du photon émis. À première vue, il semble que ces deux impulsions consécutives s'annulent : pour chaque photon absorbé, un autre est ré-émis. En fait, quand l'atome est dans un faisceau laser, tous les photons absorbés proviennent de la même direction, alors que les photons ré-émis partent au hasard dans toutes les directions. Les impulsions ne se compensent donc pas, et à mesure qu'ils diffusent des photons, les atomes situés dans le faisceau laser acquièrent un mouvement parallèle à celui du faisceau (*voir la figure 65*).

Supposons maintenant que l'atome soit non pas immobile, mais en mouvement vers la source de lumière laser. Continue-t-il à absorber les photons ? La réponse est négative, car bien que les photons aient la bonne longueur d'onde pour un atome au repos,



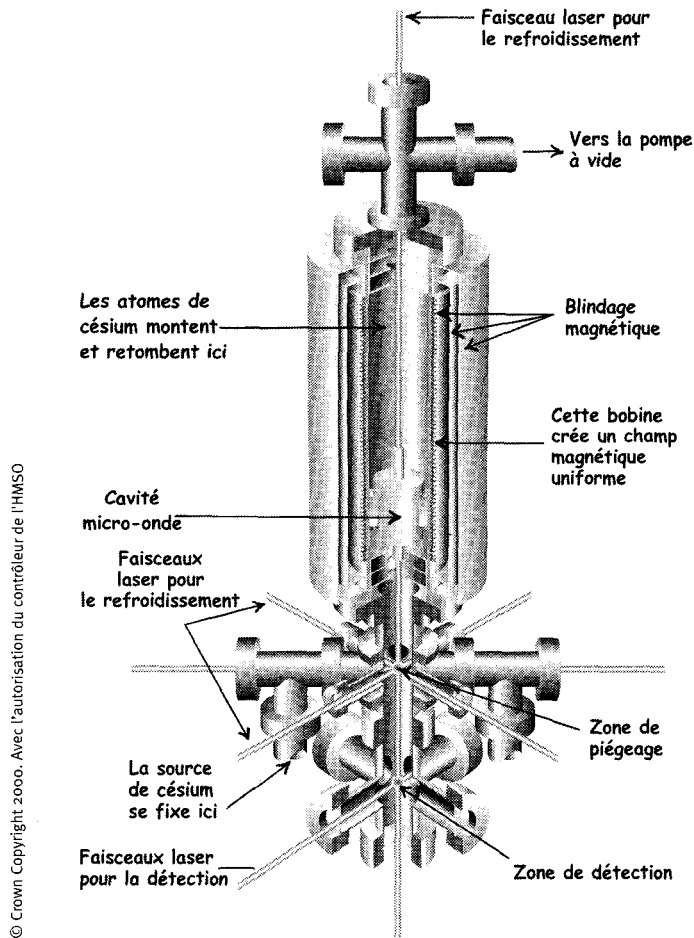
65. Un atome de césium diffuse les photons d'un laser accordé sur la bonne longueur d'onde ; à cause du recul, il acquiert un mouvement parallèle à celui du faisceau laser.

l'effet Doppler (*voir le chapitre 2*) décale leur longueur d'onde vers le bleu, pour cet atome en mouvement, à une longueur d'onde plus faible. L'atome voit les photons s'écouler, mais puisqu'ils n'ont pas la bonne longueur d'onde, il ne peut les absorber : rien ne se passe. Toutefois, nous pouvons anticiper ce phénomène : rien ne nous empêche de régler la longueur d'onde émise par le laser sur une valeur à peine supérieure à 852 nanomètres. Si le réglage est correct, l'atome verra des photons décalés vers le bleu par effet Doppler, exactement à une longueur d'onde de 852 nanomètres et il va les absorber ! Comme ici l'atome va à contre-courant du faisceau laser, la petite pichenette qu'il recevra va s'opposer à son mouvement : il va ralentir. Un atome de césium sous forme gazeuse à température ambiante peut ainsi être quasiment arrêté, à condition d'absorber et de ré-émettre environ 70 000 photons. La température d'un gaz est une mesure de la vitesse des atomes qui le constituent ; c'est pourquoi on dit qu'un tel ensemble d'atomes ainsi ralentis est « refroidi ». Plus techniquement, on parle de « refroidissement Doppler ».

Aujourd'hui, cette technique a envahi de nombreux domaines de la physique. Elle a constitué une telle avancée que les scientifiques qui ont participé à son développement, ou à d'autres tech-

niques de refroidissement par laser, ont reçu le prix Nobel de physique en 1997 ; les récipiendaires étaient Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William Phillips.

Prenons l'exemple de la fontaine à césium du NPL. Le césium sous forme solide se trouve dans un réservoir qu'on fixe au bas d'une chambre à vide (voir la figure 66). De là, il s'évapore lentement et



66. Schéma de la fontaine à césium expérimentale du NPL.



remplit la cavité d'une atmosphère ténue de gaz de césium. Le vide – 1 000 milliards de fois moins dense que la pression atmosphérique – garantit que des molécules d'air indésirables ne gêneront pas le mouvement des atomes de césium.

Les atomes de césium se déplacent en tous sens dans la cavité, dans une sorte de « marche au hasard ». Un jour ou l'autre, ils se retrouvent à l'intersection des 6 faisceaux laser, tous accordés sur une longueur d'onde légèrement supérieure à 852 nanomètres. Si l'atome y est au repos, tout va bien et rien ne se passe. Si l'atome se déplace dans une direction quelconque, il va rencontrer, à contre-courant, un ou plusieurs faisceaux laser et « voir » leurs photons décalés vers le bleu. Il va alors commencer à les diffuser, ce qui le ralentira.

On sait aujourd'hui accumuler et refroidir plusieurs millions d'atomes à l'intersection des faisceaux laser. Comme ces atomes rencontrent une résistance « visqueuse » dans quelque sens qu'ils se déplacent, la région où on les confine a reçu le nom de « mélasse optique ». Le confinement n'est pas permanent : des atomes entrent et sortent à tout moment de la mélasse, mais ils y restent piégés un certain temps.

Le refroidissement obtenu est extrêmement important. Les températures ambiantes normales sont proches de 300 degrés au-dessus du zéro absolu (la température la plus basse, à laquelle l'immobilité est quasi-parfaite), ou 300 kelvin (que l'on note 300 K). L'eau gèle à 273 K et bout à 373 K ; la température la plus basse jamais mesurée à la surface de la Terre est voisine de 200 K. À 77 K les molécules d'azote de l'atmosphère – il en est le constituant principal – se déplacent si lentement qu'elles deviennent liquides ; à 63 K, elles gèlent. Le refroidissement Doppler, lui, arrive bien au-dessous de 1 K.

Des calculs théoriques montrent que la température minimale pour un refroidissement Doppler du césium est... 0,000125 K, soit 125 microkelvins. À ces températures incroyablement basses, les atomes se déplacent à des vitesses de quelques centimètres par

seconde seulement. Depuis la découverte du refroidissement Doppler, les physiciens ont inventé ou raffiné d'autres mécanismes de refroidissement permettant de s'approcher encore plus près du zéro absolu. Aujourd'hui, dans une fontaine à césium, on refroidit couramment les atomes à quelques microkelvins, alors que des techniques plus perfectionnées permettent d'atteindre quelques nanokelvins – quelques milliardièmes de degré.

Dans la fontaine à césium du NPL, les atomes se rassemblent en un nuage ultra-froid dans la mélasse optique, à l'intersection des faisceaux laser. Pour les y maintenir, un champ magnétique d'une forme adaptée leur est appliqué ; on parle de « piège magnéto-optique ». Il n'est pas nécessaire de les y injecter : ils s'y retrouvent tout seuls et sont alors pris au piège.

Quand le nuage est prêt à faire le grand saut – vers le haut, à travers la chambre cylindrique –, on coupe le champ magnétique de piégeage et, simultanément, on modifie imperceptiblement la longueur d'onde des faisceaux laser verticaux : cela suffit à propulser les atomes vers le haut à la bonne vitesse. Pendant leur envolée, une brève impulsion micro-onde les fait passer dans l'état hyperfin bas, et un flash laser final se charge d'éliminer tous les atomes qui seraient restés derrière.

Tous les lasers sont alors éteints. Les atomes de césium s'élèvent dans l'obscurité de la cavité remplie de micro-ondes, ils en émergent vers le haut, s'arrêtent puis y retombent. Si la fréquence des micro-ondes est bien réglée, les deux passages des atomes dans la cavité suffisent à envoyer la grande majorité d'entre eux dans l'état hyperfin haut. Au cours de leur chute, ils retraversent la zone de piégeage – maintenant inactive – en direction du bas de l'appareillage. Là, d'autres faisceaux laser ré-excitent les atomes, ce qui permet de dénombrer la population exacte de chacun des états en comptant les photons qu'ils ré-émettent à ce moment. Comme dans les autres étalons à césium, on ajuste la fréquence des micro-ondes jusqu'à obtenir un signal maximal – c'est-à-dire un nombre maximum d'atomes

de césium ayant subi une transition hyperfine. Dans ces conditions, la fréquence des micro-ondes est égale au chiffre magique – et que vous connaissez maintenant par cœur – de 9 192 631 770 hertz.

La précision d'une horloge à fontaine de césium est d'autant meilleure que le temps séparant les deux impulsions de micro-ondes est grand. Aussi, on voudrait en principe que le vol des atomes se prolonge indéfiniment. Cela n'est pas possible car, en même temps que le nuage est expédié vers les hauteurs, il commence à se répandre, à se dilater. Si l'on attend trop longtemps, la majorité des atomes se retrouvent collés aux parois de la chambre à vide et ne retransversent donc jamais la deuxième impulsion de micro-ondes. C'est principalement pour cette raison que l'on refroidit les atomes autant que faire se peut avant de les expédier vers le haut. En pratique, on est capable de lancer les nuages toutes les 1,2 seconde.

Néanmoins, il reste un problème bien curieux à résoudre, un effet bizarre de la mécanique quantique : les atomes en mouvement très lent... empâtent. Un atome de césium qui se déplace à 1 centimètre par seconde semble avoir un diamètre 500 fois supérieur à sa taille usuelle. Il ne s'agit pas seulement d'une façon de parler, car ces atomes étalés se cognent vraiment plus fréquemment, à tel point que la précision de l'horloge en souffre ; de plus, les niveaux d'énergie de l'atome en sont eux-mêmes perturbés.

Les employés du NPL sont en train de construire une deuxième fontaine à césium destinée à devenir un étalon primaire. Ils ne sont pas les seuls et de nombreuses autres devraient être opérationnelles d'ici quelques années, rejoignant ainsi la fontaine pionnière du LPTF de Paris. Nul doute que la précision du TAI et de l'UTC en seront grandement améliorées, ce qui ne signifie pas pour autant que les horloges plus classiques partiront au rebut immédiatement !

### **Des horloges dans l'espace**

Les fontaines à césium sont particulièrement séduisantes, car le temps d'interaction des atomes, entre la montée et la redescende

à travers la cavité micro-ondes, peut y atteindre une seconde. Imaginons une fontaine embarquée à bord d'un vaisseau spatial : la gravité n'est plus là pour faire retomber les atomes. Une fois refroidis par laser – exactement comme pour une fontaine à césium terrestre – les atomes conservent leur faible vitesse, même après l'extinction des lasers de piégeage. Sur la Terre, ils retomberaient tout de suite, mais dans l'espace, on pourrait en principe fabriquer des paquets d'atomes ultra-froids puis les laisser flotter en apesanteur aussi longtemps qu'on le souhaiterait entre deux expositions aux micro-ondes.

Cette idée est prise aujourd'hui très au sérieux : il existe deux projets d'installation d'horloges atomiques expérimentales à bord de la Station Spatiale Internationale, qui est en cours de construction, 400 kilomètres au-dessus de nos têtes. L'un de ces projets est américain, l'autre européen.

Le projet européen s'appelle ACES (*Atomic Clock Ensemble in Space*, soit ensemble d'horloges atomiques dans l'espace)<sup>34</sup> et il devrait arriver sur la Station en 2005. L'instrument principal s'appelle PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite) ; c'est une horloge à césium dérivée de la première fontaine atomique du LPTF. Dans cette situation de micro-gravité, l'horloge devrait atteindre une stabilité d'une partie pour  $10^{16}$  ou  $10^{17}$  sur une journée, avec une précision d'une partie pour  $10^{16}$ . Une seconde horloge, le Maser à Hydrogène Spatial (SHM, pour *Space Hydrogen Maser*), fabriqué par l'Observatoire de Neuchâtel, en Suisse, servira d'étalon de référence local afin de déterminer les performances de PHARAO.

Au chapitre 5, nous avons vu comment employer un réseau de stations au sol pour mesurer par laser l'altitude de satellites en orbite, par exemple les Lageos. Les mêmes stations pourront être utilisées pour transférer au sol l'échelle de temps fournie par ACES, à

---

34. *Aces signifie également experts ou champions (N.d.T.).*

l'aide d'une nouvelle technique. ACES sera installé à l'extérieur de la Station, et il sera équipé de réflecteurs laser semblables à ceux déposés sur la Lune ou portés par les satellites Lageos. ACES chronométrera les temps d'arrivée d'impulsions laser à l'aide de son horloge atomique ; en parallèle, les stations au sol calculeront le temps d'aller-retour des impulsions lumineuses qu'elles auront émises. Cette variante du transfert de temps par aller-retour permettra de communiquer l'heure de ACES vers le BIPM, aux fins d'incorporation dans le TAI. Comme les responsables du projet sont bien conscients que les transmissions laser ne se font pas par temps nuageux, un système redondant de transfert du temps a été prévu, qui fonctionne avec des faisceaux de micro-ondes.

Ces deux projets, ACES et le projet américain, sont pionniers : rien ne garantit qu'ils seront couronnés de succès ni que l'avenir de la mesure du temps passe par les techniques spatiales. On ne peut s'empêcher de s'inquiéter des difficultés inhérentes à la présence d'horloges atomiques sur une station spatiale peuplée et active : parviendra-t-on à s'affranchir du bruit et des vibrations causées par d'autres appareillages situés à bord, sans parler des champs électromagnétiques ?

Le jeu en vaut néanmoins la chandelle. Même si ACES n'est qu'un banc d'essai d'une éventuelle installation définitive d'horloges dans l'espace, son fonctionnement garantira des progrès dans le transfert des temps TAI et UTC – on espère un gain d'un facteur 100 par rapport à aujourd'hui – et il permettra sûrement d'accomplir de nouveaux tests de la relativité générale.

### **Et après le césium ?**

La définition de 1967 de la seconde a largement prouvé sa valeur, et l'atome de césium reste l'élément de choix dans la construction des horloges atomiques. En sera-t-il longtemps ainsi ?

Actuellement, plusieurs équipes de recherche se penchent sur la réalisation d'étalons de fréquence fonctionnant dans la partie optique du spectre des ondes électromagnétiques, plus précisément

la lumière visible ou l'infrarouge proche. L'avantage de ces ondes optiques est que les fréquences y sont bien plus élevées. Alors qu'une horloge au césium bat environ 9 milliards de fois par seconde, une horloge fonctionnant avec de la lumière visible battrait à peu près 70 000 fois plus vite, et sa précision serait automatiquement améliorée du même facteur.

Les « gardiens du temps » ne sont pas les seuls scientifiques à s'intéresser à ce domaine des étalons optiques de fréquence. Comme le mètre est aujourd'hui défini par rapport à la seconde (ainsi que nous l'avons vu au chapitre précédent), un étalon de fréquence fournit aussi un étalon de longueur. En pratique, c'est un peu plus compliqué, car des mesures précises de longueur nécessitent des lasers fonctionnant avec de la lumière visible, tandis que les étalons au césium utilisent des micro-ondes. À ce jour, les meilleurs étalons de longueur sont des lasers hélium-néon stabilisés à l'iode, qui émettent une lumière rouge à 633 nanomètres. Ces étalons ont beau être précis à 2,5 parties pour  $10^{11}$ , les métrologistes des longueurs accueilleraient à bras ouverts un meilleur étalon primaire dans le domaine optique, avec lequel ils pourraient comparer leurs propres lasers.

Attraper un seul atome est certainement le rêve de tout spectroscopiste. L'étalon de fréquence idéal serait un atome unique, au repos dans l'espace libre, loin de toute influence perturbatrice. Au chapitre 2, nous avons rappelé que, voilà plus d'un siècle, Lord Kelvin avait spéculé sur l'utilisation d'atomes comme « étalons naturels » de longueur et de temps, grâce aux longueurs d'onde extrêmement bien définies de la lumière qu'ils émettent et absorbent. Plusieurs équipes de recherche à travers le monde tentent aujourd'hui de construire de nouveaux étalons de fréquence basés sur la lumière émise et absorbée non pas par un groupe d'atomes, mais par un atome unique.

Quel type d'atome choisir ? Il est bien plus aisé de capturer un ion qu'un atome. Un ion est un atome qui a gagné ou perdu un ou plusieurs électrons, de telle sorte que la charge positive du noyau

n'est plus équilibrée par celle, négative, de ses électrons. Un ion porte donc une charge électrique nette, ce qui permet de le capturer à l'aide d'un champ électrique, tâche impossible pour un atome neutre. En pratique, il faut donc trouver un atome doté d'une configuration électronique avantageuse *après* la perte d'un électron. De nombreux éléments ont été étudiés, en particulier les métaux dits alcalino-terreux, dotés de deux électrons périphériques. S'ils en perdent un, ils se retrouvent avec un seul électron externe, et une structure semblable à celle des alcalins – et en particulier du césium. Les alcalino-terreux stables sont au nombre de cinq : béryllium, magnésium, calcium, strontium et baryum. Il existe d'autres métaux présentant des propriétés semblables, et qui méritent d'être étudiés : parmi eux, le mercure, l'indium et l'ytterbium.

Cela fait maintenant des années que des scientifiques ont étudié des étalons de fréquence expérimentaux fondés sur des ions piégés. Toutefois, ceux-ci fonctionnent à des fréquences situées dans la partie micro-ondes du spectre, bien souvent avec des transitions hyperfines semblables à celle du césium. Aux États-Unis, un groupe du NIST a réalisé un étalon de fréquence à partir de quelques ions de mercure (*voir la figure 67*). Comme dans la fontaine à césium, les ions sont refroidis par des lasers mais, au lieu d'être lancés en l'air pour leur faire traverser une cavité micro-onde, ils demeurent dans ce piège où on peut les exposer à deux trains de micro-ondes séparés par une centaine de secondes.



© National Institute of Standards and Technology

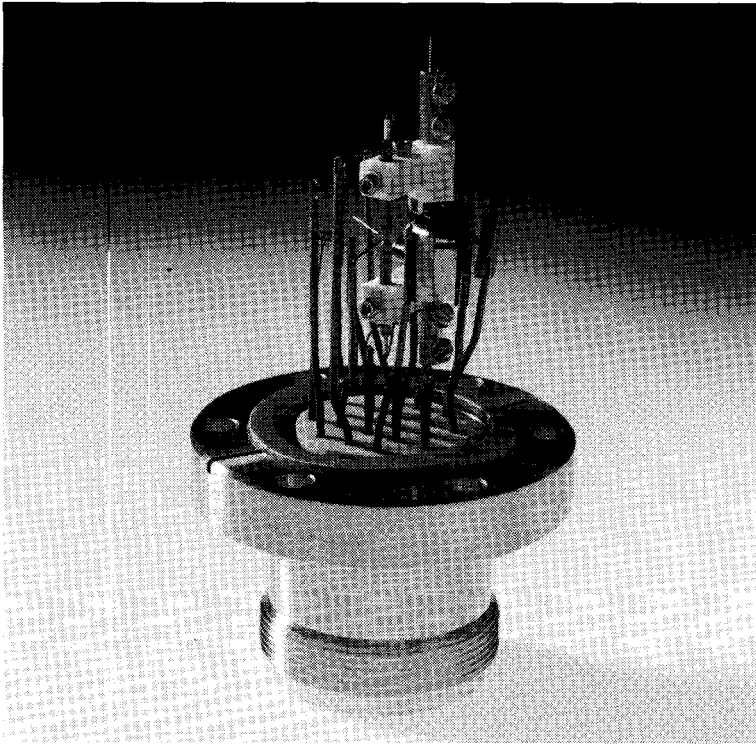
67. Une chaîne d'ions de mercure retenus dans un piège de l'Institut américain de métrologie NIST. Ces ions peuvent être utilisés comme étalons de fréquence, par exposition à des rayonnements micro-onde correspondant à leur fréquence de transition hyperfine.

S'il est certain que cette technique promet une grande précision, il reste encore une embûche de taille : apprendre à faire fonctionner ces étalons à des fréquences optiques. Des équipes de recherche s'y attellent aux États-Unis, au Canada, en Allemagne, en France, au Royaume-Uni, au Japon et en Chine. Des équipes d'autres pays poursuivent des recherches similaires pour aboutir à ces horloges « ioniques ».

Pour prendre un exemple, un groupe du NPL a construit un piège visant à isoler un unique atome de strontium, un métal mou dont vous avez peut-être déjà vu les contributions d'un beau rouge aux feux d'artifice, ou aux fusées de détresse. (Le strontium est aussi l'objet des attentions d'une équipe du Conseil National de la Recherche canadien.) On évapore d'abord les atomes dans un petit four, puis on les ionise avec un filament chauffé au rouge, et on les capture enfin dans un champ électrique. La technique est si sensible que les physiciens du NPL sont capables de capturer un ou deux ions à la fois au cours d'une séquence de remplissage du piège, qui dure une minute. S'ils en attrapent plus d'un, tout est à recommencer ! Quand ils sont sûrs que le piège n'en contient qu'un, ils utilisent un laser pour refroidir l'ion à une température inférieure à 1 millikelvin par une technique Doppler semblable à celle de la fontaine à césium. L'ion refroidi peut demeurer prisonnier indéfiniment ou presque, jusqu'à ce qu'une molécule « intruse » le déloge par collision. Le record actuel d'emprisonnement pour un ion unique au NPL dépasse un mois (*voir la figure 68*).

Une fois l'ion capturé et refroidi, l'étape suivante consiste à trouver une transition d'« horloge » bien adaptée, susceptible de fournir un étalon de fréquence analogue de la transition hyperfine du césium. Les transitions les mieux définies, celles dont la fréquence est connue avec la meilleure précision possible, sont aussi celles qui correspondent à des états ayant une durée de vie assez longue. Quand un électron est excité vers un niveau d'énergie plus élevé, il y passe quelque temps avant de redescendre. Pour la plupart





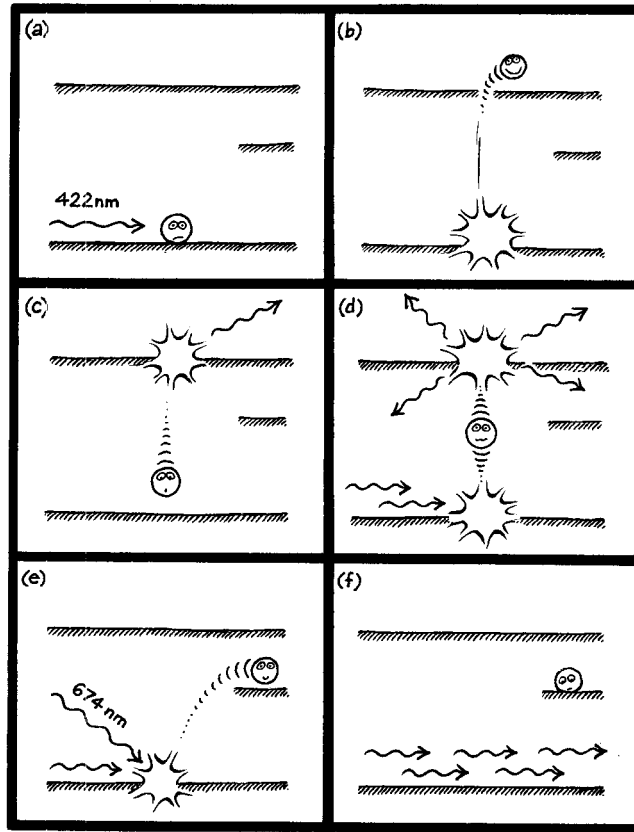
68. Un piège réalisé au NPL pour confiner des ions de strontium ou d'yttrium. L'ion est capturé entre les deux grosses électrodes pointues situées un peu au-dessus du centre de l'image.

des transitions, ce temps est extrêmement court, quelques nanosecondes ou moins ; mais plus l'électron reste sur le niveau excité avant de redescendre, meilleure est la précision avec laquelle la fréquence de transition peut être connue. Les états de « longue » durée de vie sont donc aussi les plus prometteurs en terme d'étalons de fréquence. La transition d'horloge du strontium a une longueur d'onde de 674 nanomètres et une durée de vie d'environ un tiers de seconde. Une autre manière de présenter cela est de dire qu'un ion de strontium peut émettre en moyenne trois photons de cette longueur d'onde par seconde.

Qui dit longue durée de vie dit aussi petit nombre de photons : comment détecter une transition aussi peu intense ? Une réponse a été trouvée par le physicien allemand Hans Dehmelt : sa technique dite des « sauts quantiques » ou bien d'« archivage des électrons » lui a valu une portion du prix Nobel de physique en 1989. L'ion strontium piégé est éclairé par un laser de refroidissement opérant à une longueur d'onde de 422 nanomètres, dans le bleu (*voir la figure 69*). Tout comme les atomes de césium décrits plus haut, l'ion strontium diffuse en permanence les photons de la lumière laser, les éparpillant en tous sens au taux de plusieurs centaines de millions par seconde. C'est ce qui permet de « voir » l'ion comme un petit point de lumière bleue en plein milieu du piège.

On éclaire alors l'ion avec un second laser, dont la longueur d'onde est proche de 674 nanomètres. La longueur d'onde du laser est ajustée petit à petit par pas infinitésimaux jusqu'à atteindre la valeur exacte permettant d'expédier l'électron du niveau fondamental vers un troisième niveau situé entre les deux premiers. Là, à cause de la grande durée de vie de ce troisième niveau, l'électron est proprement « archivé » et l'ion ne peut plus diffuser la lumière bleue du premier laser comme auparavant – il se dérobe à notre vue. Dès que le centre du piège devient sombre, c'est la preuve que l'ion n'est plus dans l'état fondamental et qu'il vient d'en être chassé par le second laser : ce dernier a donc une fréquence exactement accordée sur la transition d'horloge. Rien de différent dans le principe avec la fréquence micro-onde réglable d'une horloge à césium ! L'électron demeure environ un tiers de seconde dans son « étagère » avant de redescendre dans le niveau fondamental, et aussitôt la lumière bleue réapparaît car l'ion recommence à diffuser la lumière du premier laser. En résumé, quand le second laser n'est pas réglé au plus juste, on observe un point lumineux bleu stable au centre du piège ; dès que l'accord du second laser est réalisé, ce point stable devient scintillant. Il faut noter d'ailleurs que cette scintillation est bien la preuve qu'il n'existe qu'un seul ion au centre du piège.

COMBIEN DURE UNE SECONDE ?



69. Comment trouver la transition d'horloge d'un ion strontium. (a) L'électron reste dans le niveau fondamental jusqu'à ce qu'il soit éclairé par de la lumière bleue à 422 nanomètres. (b) Il absorbe alors un photon et se retrouve sur un niveau excité de l'ion. (c) Quelques nanosecondes plus tard, l'électron retombe en émettant un photon identique, et le cycle peut alors se reproduire. (d) Soumis à un éclairage constant, l'ion diffuse la lumière bleue en permanence. (e) On envoie alors une seconde lumière laser, de longueur d'onde proche de 674 nanomètres. Si la longueur d'onde est bien accordée, l'électron absorbe un photon de ce second laser et se retrouve sur un troisième niveau où il demeure un tiers de seconde. (f) Pendant qu'il est ainsi « archivé », l'électron ne peut plus diffuser les photons de lumière bleue et le centre du piège s'assombrit brusquement : cela prouve que le second laser est exactement accordé sur la transition d'horloge.

Des techniques semblables sont utilisées un peu partout pour étudier d'autres ions. On ne sait pas encore lequel de tous ces ions s'avérera indispensable à la réalisation du meilleur étalon de fréquence optique (et donc de la meilleure horloge) ; mais ces recherches sont centrées sur les ions dont la fréquence de transition est définie avec la meilleure précision possible. En 1997, des physiciens du NPL ont réussi à provoquer une transition extrêmement faible dans l'ytterbium, un métal rare qu'on ne trouve dans la croûte terrestre qu'à l'état de traces. (Un groupe du PTB de Brunswick étudie ce même ion, mais à une longueur d'onde différente.) Pour comprendre l'ampleur de cet exploit, sachez que la durée de vie de ce niveau est supérieure à... dix ans ! C'est la plus longue durée de vie d'un niveau atomique jamais observée. Une fois l'électron mis dans cet état, il y resterait coincé pour une bonne décennie avant de se décider à redescendre par ses propres moyens, en émettant un photon d'une longueur d'onde de 467 nanomètres. Comme il ne serait pas particulièrement commode ni judicieux d'attendre dix ans que cet électron se décide à changer d'« étagère » tout seul, on préfère utiliser un troisième laser pour l'envoyer sur un niveau plus élevé d'où il redescend rapidement dans le niveau fondamental ; le cycle peut alors reprendre. Cette durée de vie extrêmement longue fait de l'ion ytterbium un candidat sérieux pour les étalons de fréquence ultra-stables du futur.

Étudions maintenant le cas de l'indium, un métal blanc argenté fort utilisé dans l'industrie électronique. Des chercheurs de l'Institut Max Planck d'Optique Quantique, près de Munich, ainsi que de l'Université de l'État de Washington à Seattle étudient actuellement une transition de lumière ultraviolette à 237 nanomètres ; elle n'est pas aussi fine que celle de l'ytterbium mais, plus facile à contrôler, elle pourrait s'avérer plus commode.

Il ne suffit pas de trouver des transitions très fines, encore faut-il que la technologie suive. Si l'on doit étudier des transitions bien définies, il faut le faire avec des appareillages fournissant des

rayonnements *encore mieux définis* : le laser permettant de l'étudier doit lui aussi avoir une longueur d'onde parfaitement connue. Le groupe pionnier du NIST, celui-là même qui a déjà réalisé un étalon fonctionnant dans le domaine des micro-ondes avec des ions de mercure, a également construit un laser plusieurs centaines de fois plus stable que tous ceux que l'on peut trouver par ailleurs. Ils prévoient de l'utiliser pour étudier une transition optique très fine du mercure dans l'ultraviolet, à 282 nanomètres.

L'obstacle principal à une horloge fonctionnant dans le domaine optique reste les valeurs élevées des fréquences en jeu – c'est pour cette raison qu'une horloge optique est tellement séduisante. La longueur d'onde de 467 nanomètres de l'ytterbium, par exemple, correspond à une fréquence de  $6,4 \times 10^{14}$  hertz, et personne ne sait encore comment compter directement, un par un, les cycles de quelque chose qui oscille 640 000 milliards de fois par seconde. On peut imaginer de parvenir, dans un futur proche, à relier cette fréquence à celle d'un étalon au césium en passant par plusieurs étapes intermédiaires, mais cela ne changera rien au fait que la précision sera alors donnée (et limitée) par celle de l'horloge au césium, et non par la transition optique.

Si des horloges atomiques basées sur une transition optique voient le jour – et il ne faut pas compter là-dessus avant plusieurs années – les chercheurs pensent atteindre des stabilités proches d'une partie pour  $10^{18}$ . Enclenchée à l'époque du Big Bang, une telle horloge donnerait aujourd'hui l'heure juste à mieux qu'une seconde !

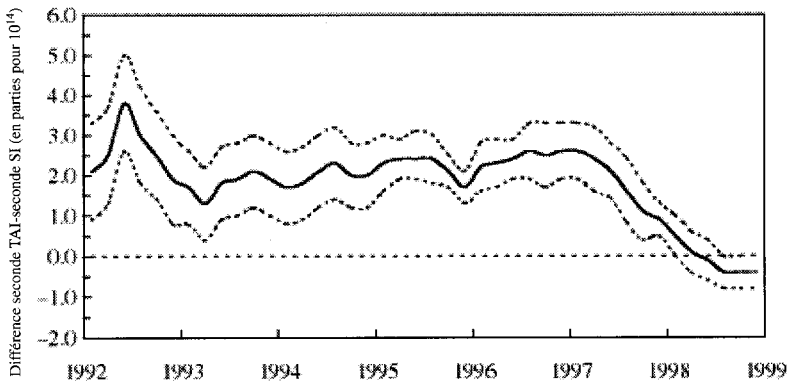
### **Vers un meilleur UTC**

Avec de meilleurs étalons primaires et de meilleures horloges secondaires, il ne fait aucun doute que l'exactitude et la stabilité du TAI et de l'UTC va aller s'améliorant, comme cela a été le cas au cours de la décennie 1990. En 1998, l'exactitude de la seconde du TAI, évaluée par son écart à la seconde SI, était meilleure que cinq parties pour  $10^{15}$  (voir la figure 70) ; dans le même temps, sa stabili-

té sur une période de 40 jours atteignait pour la première fois la valeur d'une partie pour  $10^{15}$ .

La fameuse seconde intercalaire continue néanmoins à semer la zizanie. Au printemps 1999, les spécialistes mondiaux du temps se sont retrouvés à Paris pour l'une de leurs conférences régulières. Dennis MacCarthy, directeur de la section temps de l'USNO, y a émis des réserves sur l'avenir des secondes intercalaires. Depuis la nouvelle définition de l'UTC en 1972, des secondes intercalaires ont été introduites afin de s'assurer que l'UTC ne s'écarte pas trop par rapport à l'UT1, l'heure fournie par la rotation de la planète Terre. Les principaux bénéficiaires de cette réforme étaient les navigateurs, qui avaient besoin d'une heure qui demeure proche de celle liée à l'orientation de la Terre dans l'espace. Avec un écart entre UTC et UT1 ne dépassant pas 0,9 seconde, n'importe qui utilisant des signaux horaires UTC et des observations de transits d'étoiles ne peut se tromper sur sa position de plus de 420 mètres.

Qui diable utilise encore les étoiles pour naviguer, faisait observer MacCarthy ? La quasi-totalité de la navigation commerciale



70. La seconde du TAI – ainsi que celle de l'UTC – ne s'est pas éloignée de la définition de la seconde SI de plus de quelques parties pour  $10^{14}$  dans les années 1990. Les deux courbes en tirets donnent une idée de l'incertitude sur l'exactitude estimée.

par air ou par mer s'appuie aujourd'hui sur les systèmes GPS ou GLONASS ainsi que sur d'autres « assistants électroniques ». De fait, les secondes intercalaires sont de plus en plus perçues comme une gêne plutôt que comme une aide. De nombreux systèmes informatiques ne sont pas programmés pour les gérer : on est obligé de les réinitialiser chaque fois qu'une seconde intercalaire est introduite. Si l'on continue avec le système actuel, poursuivait MacCarthy, nous aurons besoin d'environ trois secondes intercalaires tous les deux ans en l'an 2050. Alors, une bonne fois pour toutes, ces secondes supplémentaires sont-elles vraiment indispensables ?

Une solution possible serait de réduire le nombre d'intercalations en augmentant la déviation autorisée entre UTC et UT1. Si une valeur de 4,9 secondes était retenue, il suffirait de faire des sauts par paquet de 5 secondes, qui seraient donc moins fréquents. Il y aurait moins de sauts mais chacun serait plus grand. On pourrait aussi accumuler -- capitaliser -- les secondes intercalaires, et les solder à des dates fixes, choisies à l'avance. La taille des sauts serait imprévisible, mais au moins les dates seraient-elles connues à l'avance.

Au chapitre 5, nous avons vu que le nombre de secondes intercalaires dépend davantage de la définition choisie pour la seconde SI que de réelles variations de la période de rotation terrestre. Il existerait donc une solution radicale : redéfinir la durée de la seconde SI pour qu'elle soit mieux adaptée à la durée actuelle du jour solaire moyen ; cela réduirait mécaniquement le nombre de secondes intercalaires. Malheureusement -- ou heureusement -- la seconde est omniprésente dans tout le système SI, et pas seulement dans les mesures de temps : les conséquences d'une redéfinition de la seconde y seraient dévastatrices. L'on peut de toute façon faire confiance au frottement des marées pour, à terme, ralentir encore la rotation terrestre : la seconde idéale d'aujourd'hui ne le serait plus demain -- ou en tout cas dans quelques décennies.

On pourrait encore décider d'abandonner définitivement les secondes intercalaires : l'UTC et l'UT1 divergeraient alors à jamais.

Supposons que nous commençons aujourd'hui : la différence pourrait atteindre une minute vers l'an 2050. Ceux qui auraient encore besoin de l'heure UT1 pourraient avoir accès à des tables de correction ; le public quant à lui ne distinguerait pas d'effets marquants sur le début du jour ou de la nuit, en tout cas pas avant de nombreux siècles.

Si la question en est restée là lors de cette réunion, c'est bien parce qu'une nouvelle discussion du problème de l'UTC et des secondes intercalaires n'a pas suscité un enthousiasme débordant ; mais certains sont clairement mécontents de ce système, ce qui permet de prédire que le sujet reviendra régulièrement sur le tapis au XXI<sup>e</sup> siècle.

Le calcul et la diffusion de l'UTC vont probablement subir quelques changements. Une des caractéristiques les moins attrayantes de l'UTC est sa disponibilité avec un mois de retard. Tous les signaux horaires qui diffusent officiellement l'« UTC », diffusent en fait des approximations de l'UTC établies par les laboratoires nationaux de métrologie. Ce n'est que quelques semaines plus tard que ces laboratoires découvrent, grâce au BIPM, la qualité de leur approximation « nationale ». La demande d'un temps précis allant croissant, la pression pour un calcul et une diffusion plus rapide de l'UTC augmentera.

La diffusion de l'heure reposera largement sur les satellites de navigation. Avec une heure GPS disponible aisément partout sur la planète, et qui ne s'écarte pas de plus de quelques dizaines de nanosecondes de l'UTC, on peut se demander à quoi sert de calculer une heure précise en utilisant n'importe quelle autre source. Voilà un défi à l'autorité des laboratoires nationaux de mesure de l'heure, qui se verraient ainsi dépossédés par le GPS de leur rôle presque légal de sources nationales de l'heure. Cette vision est un peu exagérée, car d'où vient l'heure du GPS ? Bien que son origine première soit la version de l'UTC établie par l'USNO, celle-ci est en dernier ressort validée et corrigée par le BIPM grâce aux efforts de dizaines de laboratoires sur cette planète.



Peut-être y aura-t-il de moins en moins de clients d'un UTC diffusé à l'échelle locale, mais ce sont bel et bien les laboratoires nationaux qui continueront de garantir la stabilité du système international de mesure du temps, grâce à leurs nombreuses horloges atomiques secondaires ; sans compter qu'un nombre croissant d'entre eux disposeront bientôt d'étalons primaires, qui assurent la stabilité de l'UTC indépendamment de la façon dont on le diffuse. Ces laboratoires joueront également un rôle croissant d'experts indépendants en matière de validation des mesures de temps et de fréquence, ainsi que de conseil aux industries locales et aux services publics. N'oublions pas non plus le réseau mondial d'observatoires et de stations de suivi des satellites : à travers l'IERS, ils permettent de surveiller la rotation terrestre en continu afin de s'assurer que l'UTC ne s'éloigne pas des signaux naturels que sont le lever et le coucher du Soleil. Ce qui fait la beauté de ce système international de mesure du temps est son caractère décentralisé et dispersé : il n'en est que plus robuste, et ne présente aucun risque de se voir confisqué par l'une ou l'autre des nations ou organisations.

Malgré ces belles paroles, il convient de se préoccuper du fait qu'une part croissante de l'économie dépend aujourd'hui de l'heure distribuée par le système GPS, qui est – ne l'oublions pas – un système de navigation de l'armée américaine ; aucun accord international ne garantit sa pérennité ! Est-il réellement prudent qu'une part si importante des activités humaines dépende aujourd'hui du seul GPS ? Le développement du système GLONASS apporte quelque réconfort, mais on ne peut s'empêcher de penser que c'est aussi un système militaire développé dans un pays – la Russie – dont la stabilité politique et économique n'est pas certaine : cela risque de décourager les utilisateurs potentiels pour certaines applications cruciales, sans parler du fait que les satellites eux-mêmes ne sont pas tous dans un état très rassurant.

Ces considérations mènent l'Union Européenne tout droit vers la réalisation d'un système de navigation par satellite, indé-

pendant et entièrement civil. La première étape en sera le satellite géostationnaire EGNOS, qui permettra de relayer les informations des satellites du GPS glanées par un réseau de stations au sol. Il s'agit en particulier de diffuser l'information sur l'état des satellites GPS, ce qui permettra aux utilisateurs de savoir lesquels sont défectueux à un moment donné, et de les ignorer dans le calcul de leur position terrestre ; l'industrie aéronautique se montre particulièrement intéressée, car cela permettrait entre autres d'automatiser les procédures de décollage et d'atterrissage des avions, en toute sécurité. Plus tard, l'Union Européenne envisage de disposer de son propre système de navigation, le projet Galileo, dont le principe et l'ampleur seront similaires à ceux du GPS et de GLONASS, mais qui pourrait disposer en outre de quelques satellites en orbite géostationnaire, mis à poste en vue directe du continent européen<sup>35</sup>.

### **Et si l'histoire avait été différente ?**

En octobre 1998, l'Observatoire royal de Greenwich a définitivement fermé ses portes. Fondé par le roi Charles II en 1675, il avait pour but de fournir aux marins des informations astronomiques leur permettant de se repérer sur la mer, en particulier de connaître leur longitude. Cela revenait à trouver un moyen de déterminer l'heure en tout point de leur trajet maritime ; la fourniture d'une heure précise est demeurée la mission principale de l'observatoire jusque dans le courant des années 1980.

Dix ans plus tard, l'observatoire n'avait plus aucune responsabilité en matière de temps ; il avait diversifié ses activités et fournissait des moyens d'observation à des groupes de recherche universitaires, tout en menant ses propres recherches astronomiques. Le gouvernement du Royaume-Uni en déduisit qu'il ne remplissait

---

35. Depuis la rédaction de ce livre, le système Galileo – 30 satellites à 23 000 kilomètres d'altitude – a été approuvé et financé par l'Union Européenne (en mars 2002). Il devrait être déployé entre 2004 et 2008 (N.d.T.).

aucune mission qui ne pouvait être menée par un autre organisme, et mit brutalement fin à une histoire vieille de 323 années.

L'un des thèmes principaux de ce livre est l'histoire des changements radicaux qui ont marqué la mesure du temps au XX<sup>e</sup> siècle, au cours duquel la responsabilité de sa détermination a basculé de la communauté des astronomes vers celle des physiciens. Il faut d'ailleurs remarquer que les seuls observatoires nationaux qui ont survécu, tels que l'Observatoire de Paris ou l'Observatoire de la Marine américaine (USNO), sont ceux qui ont su prendre le virage du temps atomique. L'Observatoire de Paris héberge le Service International de la Rotation Terrestre (IERS) ainsi qu'un ensemble remarquable d'horloges atomiques – dont la plus précise au monde, la première fontaine à césium. L'USNO dispose quant à lui d'un parc impressionnant d'horloges contribuant pour près de 40 pour cent à l'établissement du Temps Atomique International, et n'oublions pas que le système GPS est synchronisé sur des horloges de l'USNO.

Cependant, toute cette histoire aurait pu se dérouler autrement. Au chapitre précédent, nous avons rencontré les pulsars, ces étoiles magnétiques incroyablement denses et en rotation très rapide, et qui émettent des flots d'impulsion radio d'une régularité... d'horloge. On en connaît aujourd'hui plus de 1 000, dont les périodes sont connues avec une précision extrême. Pour ne donner qu'un exemple, le pulsar le plus rapide, PSR 1937+21, a une période de rotation de 0,0015578064924327 seconde, avec une incertitude de plus ou moins quatre sur la dernière décimale, soit une précision relative de 2,6 parties pour  $10^{13}$ . Ce n'est pas tellement éloigné de la stabilité de certains des étalons primaires de fréquence que nous avons rencontrés au chapitre 4.

Dans les années 1980, les astronomes se demandaient si, à terme, les pulsars pourraient fournir une échelle de temps plus stable que celle des horloges atomiques. La rotation des pulsars ralentit régulièrement, mais il se trouve que le taux de ralentissement est

lui aussi extrêmement bien connu : rien n'empêchait d'imaginer alors une échelle de temps très stable basée sur les pulsars les plus prévisibles, et accessible à tous. Mais la science et la technique avancent et, au tournant du XXI<sup>e</sup> siècle, on ne voit plus bien comment une assemblée d'étoiles en rotation pourrait soutenir la comparaison avec le système de mesure du temps élégant et précis – et basé sur des constantes fondamentales de la Nature – que fourniront bientôt de nombreuses fontaines à césium ou des horloges fondées sur un atome unique flottant dans l'espace.

Les pulsars ont été découverts en 1967, mais ce fut par hasard et les astronomes auraient été fort capables de les découvrir dix ans plus tôt. On ne peut que s'interroger sur ce qu'aurait été le cours de l'histoire de la mesure du temps si cela s'était produit. L'Union Astronomique Internationale aurait probablement choisi de remplacer le Temps Universel par le Temps des Pulsars, plutôt que de recourir à l'ésotérique et inaccessible Temps des Éphémérides. Et ce livre aurait été bien différent.



# Appendice

## Organismes internationaux

Plusieurs organismes sont responsables du système mondial de mesure du temps. Chacun possède son site Internet, où l'on peut trouver de nombreuses informations sur la mesure du temps, ainsi que des pages de liens. La plupart des sites sont en langue anglaise. Attention : les adresses des sites peuvent changer ; cette liste est à jour début 2003.

### Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

Le BIPM est le gardien du Système International SI, c'est-à-dire de toutes les unités de mesure. Depuis 1988, il est aussi responsable du calcul des échelles de temps dites TAI (Temps Atomique International) et UTC (*Universal Time Coordinated*, soit Temps Universel Coordonné). Chaque mois, le Bureau publie la Circulaire T, qui contient toutes les corrections à appliquer aux versions « nationales » de l'UTC, c'est-à-dire des tables d'écarts entre chaque UTC national (ou régional) et l'UTC « central ». Les circulaires T les plus récentes sont disponibles sur son site Internet.

Adresse : Section du Temps, BIPM, Pavillon de Breteuil, 92312 Sèvres, France

Site : <http://www.bipm.fr>

### *International Earth Rotation Service (IERS)*

Le Service International de la Rotation Terrestre a été créé en 1988 conjointement par l'Union Astronomique Internationale (UAI) et l'Union Internationale de Géodésie et Géophysique (IUGG). Il est chargé de la définition et du calcul de deux systèmes de référence, le système terrestre et le système céleste. A ce titre, il suit et mesure la rotation terrestre, lien entre ces deux systèmes. C'est pour cette raison qu'il est chargé de décider des secondes intercalaires, nécessaires pour conserver le temps UTC proche du temps UT1. Tous les bulletins récents concernant la rotation terrestre – direction de l'axe des pôles, relation entre UT1 et UTC, liste des secondes intercalaires depuis 1972... – sont accessibles sur son site Internet.

Adresse : Service International de la Rotation Terrestre, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Site : <http://hpiers.obspm.fr>

### *Union Astronomique Internationale (UAI)*

L'UAI (IAU en anglais) a été fondée en 1919 pour promouvoir et coordonner la coopération internationale en astronomie. Elle a perdu le rôle central dans la mesure du temps, mais comporte toujours une Commission du Temps, qui supervise le travail de l'IERS.

Adresse : Union Astronomique Internationale, 98 bis boulevard Arago, 75014 Paris, France

Site : <http://www.iau.org>

### *Union Internationale des Télécommunications (UIT)*

L'UIT (ITU en anglais) est l'organisation internationale au sein de laquelle gouvernements et opérateurs privés coordonnent les services et systèmes de télécommunications à l'échelle de la planète. C'est elle qui gère les accords internationaux qui définissent le temps UTC en fonction du TAI.

Adresse : Union Internationale des Télécommunications, Place des Nations, CH-1211 Genève 20, Suisse

Site : <http://www.itu.int>

### **Organismes nationaux**

De nombreux pays disposent de centres nationaux de mesure du temps : la liste qui suit n'en représente qu'une faible fraction, mais elle inclut tous ceux qui détiennent un étalon primaire de fréquence contribuant au TAI.

#### *Communications Research Laboratory (CRL), Japon*

L'actuel laboratoire de recherche sur les communications a été fondé en 1952 sous le nom de laboratoire de recherche sur les ondes radio, mais ses racines remontent à 1896. Il dispose d'un nouvel étalon primaire à pompage optique, CRL-O1, inspiré de l'étalon NIST-7, et contrôle les signaux horaires émis par les stations JG2AS et JJY.

Adresse : Communications Research Laboratory, 4-2-1, Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184, Japon

Site en anglais : <http://www.crl.go.jp/overview/index.html>

#### *Institute of Metrology for Time and Space (IMVP), Russie*

L'Institut russe de métrologie du temps et de l'espace est équipé d'un étalon à jet de césium, MCsR-102, et émet des signaux horaires et des fréquences étalons sur les stations de radio RBU et RWM.

Adresse : IMVP, GP « VNIIFTRI », Mendeleevo, Région de Moscou, 141570 Russie

Site (en russe uniquement) : <http://www.vniiftri.ru/>

#### *Institut des Étalons Nationaux de Mesure (IENM/INMS), Canada*

Ce laboratoire du Conseil National de la Recherche du Canada maintient deux étalons à jet de césium, CsVI-A et CsVI-C. Il contrôle également la station de radio CHU.

Adresse : Institute for National Measurement Standards, Montreal Road, Building M-36, Ottawa, Canada K1A 0R6

Site : [http://inms-ienm.nrc-cnrc.gc.ca/main\\_f.html](http://inms-ienm.nrc-cnrc.gc.ca/main_f.html)



**Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF),  
France**

Le LPTF, l'un des cinq laboratoires du Bureau National de Métrologie, est responsable des étalons de temps et de fréquence français. C'est lui qui a construit la première fontaine à césium, LPTF-FO1, qui est à ce jour l'étalon primaire le plus précis.

Adresse : BNM-LPTF, Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Site : <http://opdaf1.obspm.fr>

***National Institute of Standards and Technology (NIST),  
États-Unis***

Fondé en 1901 sous le nom de National Bureau of Standards, le NIST (Institut national des étalons et de la technologie) abrite deux étalons primaires, NIST-7 et NIST-F1, et contrôle les stations de radio WWV, WWVH et WWVB. Le NBS a été le siège de nombreux travaux pionniers dans le domaine des horloges atomiques ; en particulier, la première horloge atomique, basée sur la transition de l'ammoniac, y fut construite en 1948.

Adresse : National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, CO 80303-3328, USA

Site : <http://www.bldrdoc.gov/timefreq>

***National Physical Laboratory (NPL), Royaume-Uni***

Le Laboratoire National de Physique est responsable des étalons de mesure nationaux du Royaume-Uni. C'est lui qui vit naître la première horloge atomique à césium opérationnelle, en 1955. Il contrôle la station de radio MSF.

Adresse : National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex TW11 0LW, Royaume-Uni

Site : <http://www.npl.co.uk/>

*National Research Laboratory of Metrology (NRLM), Japon*

Au sein de l'agence nationale de science et technologie industrielles, ce laboratoire de recherche japonais sur la métrologie est le laboratoire d'étalons nationaux du Japon depuis 1903. Il possède un étalon à jet de césium à pompage optique, NRLM-4.

Adresse : National Research Laboratory of Metrology, 1-1-4, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japon

Site (en anglais) : <http://www.nrlm.go.jp/english/>

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Allemagne*

Le PTB est le laboratoire national des étalons allemand. C'est au PTB que, dans les années 1930, des scientifiques mirent en évidence les variations saisonnières de la rotation terrestre. On y trouve des étalons de fréquence qui sont parmi les plus fiables au monde. Le PTB gère aussi la station de radio DCF-77.

Adresse : Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Postfach 3345, D-38023 Braunschweig, Allemagne

Site : <http://www.ptb.de>

*United States Naval Observatory (USNO), États-Unis*

L'USNO, Observatoire naval des États-Unis, est l'un des leaders mondiaux en matière de mesure du temps, que ce soit astronomique ou atomique. Il possède d'ailleurs le parc le plus vaste d'horloges atomiques qui soit. Dans les années 1950, les astronomes de l'USNO collaborèrent avec les physiciens du NPL pour relier la seconde du temps atomique à celle du temps des éphémérides TE.

Adresse : United States Naval Observatory, 3450 Massachusetts Avenue NW, Washington, DC 20392-5420, USA

Site : <http://tycho.usno.navy.mil>

### **Autres sites Internet sur la mesure du temps**

GPS : <http://tycho.usno.navy.mil/gps.html>

Informations sur le système de positionnement global de l'armée américaine.

GLONASS : via [http://www.rssi.ru/SFCSIC/SFCSIC\\_main.html](http://www.rssi.ru/SFCSIC/SFCSIC_main.html)

Le centre de contrôle du système russe de navigation par satellite.

GALILEO : via <http://www.esa.int/>

Le système de positionnement par satellite de l'Agence Spatiale Européenne et de l'Union Européenne, qui doit être mis en place entre 2004 et 2008.

ACES et PHARAO : via <http://www.cnes.fr/>

Le site de l'agence spatiale française permet d'accéder à des informations sur ce projet européen d'horloges atomiques embarquées sur la station spatiale internationale.

PARCS : <http://www.boulder.nist.gov/timefreq/cesium/parcs.htm> décrit le projet américain d'horloges atomiques à bord de la station spatiale.

<http://www.timeanddate.com> et <http://www.worldtime.com> sont deux sites fournissant l'heure en (presque) n'importe quel point du Globe.

[http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps\\_f.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html) est un site pédagogique en anglais sur le GPS.

Horology : <http://www.horology.com>

Un guide fournissant de nombreux liens Internet sur la mesure du temps.

## APPENDICE

*Long Now Foundation* : <http://www.longnow.org>

Un projet de construction d'une horloge monumentale prévue pour durer 10 000 ans.

*Royal Observatory Greenwich* : <http://www.rog.nmm.ac.uk>

L'Observatoire royal de Greenwich n'existe plus, mais sa mémoire est préservée dans l'antique bâtiment de l'observatoire, actuellement siège du Musée National de la Marine, et qui s'intéresse aussi à l'histoire de la mesure du temps.

*National Museum of Science and Industry* :

<http://www.nmsi.ac.uk/collections/exhiblets/atomclock/start.htm>

Le musée des sciences de Londres abrite la première horloge atomique à césium opérationnelle, construite au NPL par Parry et Essen.



## Liste des sigles

Dans le domaine de la mesure du temps les sigles sont couramment utilisés. Voici un glossaire de ceux qui reviennent fréquemment dans ce livre.

BIH – Le Bureau International de l'Heure a été l'organisme responsable de la coordination des échelles de temps mondiales ; depuis 1988, il a été remplacé par le BIPM et l'IERS.

BIPM – Le Bureau International des Poids et Mesures est l'organisme responsable des étalons de mesure internationaux. Sa « Section Temps » diffuse le TAI et l'UTC.

CGPM – La Conférence Générale des Poids et Mesures est l'organisme inter-gouvernemental qui supervise les travaux (scientifiques) du CIPM et du BIPM.

CIPM – Le Comité International des Poids et Mesures est une commission d'experts chargée de superviser le BIPM.

DCF77 – Un service de radiodiffusion, à partir de l'Allemagne, d'étalons de temps et de fréquence.

EAL – L'Échelle Atomique Libre est une échelle de temps à écoulement libre (c'est-à-dire sans secondes intercalaires et dont le taux d'avancement peut légèrement varier) ; elle est calculée à partir de la moyenne d'un grand nombre d'horloges atomiques de la planète.

ET – *Ephemeris Time*, le Temps des Éphémérides (voir TE).

GLONASS – *Global Navigation Satellite System*, le système global de navigation par satellite de la Russie.

GMAT – *Greenwich Mean Astronomical Time*, l'heure astronomique moyenne de Greenwich, est une ancienne échelle de temps reliée à l'heure de Greenwich GMT, et dans laquelle le numéro du jour changeait à midi au lieu de minuit.

GMT – *Greenwich Mean Time*, l'heure moyenne de Greenwich, est une ancienne échelle de temps définie à partir du temps solaire moyen à l'observatoire de Greenwich, près de Londres. Elle a été remplacée<sup>36</sup> par le temps universel TU (ou UT) en 1928, puis par le temps universel coordonné UTC en 1960. C'est en 1975 que la CGPM a recommandé officiellement le remplacement du GMT par l'UTC (voir la dernière section du chapitre 4).

GPS – *Global Positioning System*, le système de positionnement global par satellite de l'armée américaine, qui comprend plus de 24 satellites en orbite haute. (L'heure diffusée par ces satellites est liée à l'UTC maintenu par l'USNO.)

IAU – *International Astronomical Union*, l'Union Astronomique Internationale (voir UAI).

IERS – *International Earth Rotation Service*, le service international de la rotation terrestre, est l'organisme chargé de surveiller la rotation terrestre et qui, à ce titre, décide de l'introduction des secondes intercalaires.

---

36. *Malgré cela, l'espoir est bien faible que ceux - et ils sont nombreux - qui continuent à utiliser l'appellation heure de Greenwich ou le sigle GMT changent leurs habitudes. (N.d.T.)*

## LISTE DES SIGLES

ITU – *International Telecommunication Union*, l'Union Internationale des Télécommunications (voir UIT).

LPTF – Le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences est le laboratoire national français des étalons de temps et de fréquence.

LST – *Local Sidereal Time*, l'heure sidérale locale, est une mesure de l'orientation de la Terre par rapport aux étoiles – de la même façon que l'heure solaire locale est une mesure de l'orientation de la Terre par rapport au Soleil.

MSF – Un service radiodiffusé depuis la Grande-Bretagne de signaux horaires et d'étalons de fréquence.

NBS – *National Bureau of Standards*, le bureau américain des étalons de mesure, aujourd'hui rebaptisé NIST.

NIST – *National Institute of Standards and Technology*, le laboratoire national de métrologie des États-Unis.

NPL – *National Physical Laboratory*, le laboratoire britannique national de métrologie.

OP – L'Observatoire de Paris, siège du LPTF et de l'IERS.

PTB – *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, le laboratoire national allemand de métrologie.

PZT – *Photographic Zenith Tube*, un tube photographique zénithal, est un télescope consacré à la mesure des culminations d'étoiles.

RGO – *Royal Greenwich Observatory*, l'Observatoire royal de Greenwich, qui a été l'observatoire national d'Angleterre.



## COMBIEN DURE UNE SECONDE ?

SI – Le Système International d'Unités (mètre, kilogramme, seconde...).

TAI -- Le Temps Atomique International est une échelle de temps déduite de l'Échelle Atomique Libre EAL après étalonnage de cette dernière à l'aide d'un petit nombre d'étalons primaires de fréquence (au césium), qui définissent la seconde du Système SI.

TE – Le Temps des Éphémérides est une échelle de temps construite à partir des mouvements des corps du système solaire. La seconde, unité de temps SI, était basée sur le TE jusqu'en 1967.

TU – Le Temps Universel a d'abord été – à partir de 1928 – le nom scientifique attribué à l'heure moyenne de Greenwich (GMT), avant de désigner, à partir de 1955 et de façon générique, les divers Temps Universels UT0, UT1, UT2, puis UTC.

UAI -- L'Union Astronomique Internationale a été longtemps responsable du système mondial de mesure du temps par l'intermédiaire du BIH.

UIT – L'Union Internationale des Télécommunications est l'agence internationale responsable, entre autres, des accords intergouvernementaux régissant la définition de l'UTC en fonction du TAI.

USNO – *United States Naval Observatory*, est l'observatoire national des États-Unis.

UT – *Universal time*, est le Temps Universel (voir TU).

UT0 -- C'est un Temps Universel « local » déterminé à partir d'observations astronomiques effectuées dans un seul observatoire. Il est donc lié au temps sidéral.

## LISTE DES SIGLES

UT1 – Le temps universel UT0, corrigé du mouvement des pôles. Il est une mesure de l'orientation de la Terre dans l'espace.

UT2 – Une sorte de temps universel UT1, mais lissé de ses variations saisonnières.

UTC – *Universal Time Coordinated*, le temps universel coordonné, est une échelle de temps construite à partir du TAI, mais qui est contrainte à demeurer proche du temps UT1. Depuis 1972, ceci est obtenu à l'aide des secondes intercalaires. L'UTC est la base de l'heure civile partout sur la Terre.

VLBI – *Very Long Baseline Interferometry*, ou interférométrie à grande base, est l'une des méthodes utilisées pour la détermination du temps UT1. On l'utilise par ailleurs principalement en radio-astronomie pour obtenir des images d'une excellente résolution.

WWV – L'un des émetteurs de radio diffusant des signaux horaires calibrés et servant d'étalon de fréquence aux États-Unis (les deux autres stations sont WWVB et WWVH).

# Index

## A

Adams (John Couch) 26  
Ammoniac 61  
Année sidérale 33, 38  
Année tropique 38, 39  
Apollo 132  
Archivage des électrons 225  
*Atomic Clock Ensemble in Space*,  
ensemble d'horloges atomiques  
dans l'espace (ACES) 219

## B

Bulletin C de l'IERS 146  
Bunsen (Robert) 51  
Bureau International de l'Heure  
(BIH) 20, 87, 89, 95, 96, 144, 160  
Bureau International des Poids et  
Mesures (BIPM) 35, 36, 95–97, 114,  
115, 117, 126, 172, 177, 205, 206,  
220, 230

## C

Caméra à double entraînement 82  
Caméra lunaire 82, 83  
Cavité de Ramsey 70, 72, 102, 104,  
107, 109  
Cercle méridien 127, 128, 180  
Césium 53, 58, 59, 60, 213, 216, 218  
Chandler (Seth) 30  
Chu (Steven) 215  
Circulaire T 117–119, 171, 237

Clemence (Gerald) 32, 33  
Cohen-Tannoudji (Claude) 215  
Comité International des Poids et  
Mesures (CIPM) 35, 37, 38, 175  
Compteur 42, 43, 56, 113  
Conférence Générale des Poids et  
Mesures (CGPM) 35, 36, 39, 91, 95,  
122  
Constante d'Avogadro 206  
Constante de Planck 207  
Convention du Mètre 35  
Coup de foudre 196  
CS2 99–101  
Culmination 13, 23

## D

Danjon (André) 31, 32, 129  
Décalage gravitationnel 175, 179,  
185–187, 193  
Dehmelt (Hans) 225  
Delaunay (Charles-Eugène) 26  
Déplacement ou mouvement des  
pôles 134  
Dilatation des durées 174, 178, 179,  
185–187, 193  
DORIS (Détermination d'Orbite et  
Radio-positionnement Intégré par  
Satellite) 135

## E

Échelle Atomique Libre (EAL) 115,  
118, 177

## INDEX

- Éclipse 137  
Écliptique 14, 17  
Effet Doppler 65, 191, 214  
Effet Sagnac 177–179, 186, 187  
Effet Shapiro 137  
Einstein (Albert) 174, 185  
Émetteurs radio 79  
Éphémérides 33  
Équation du temps 16, 17, 30  
Essen (Louis) 66, 72, 75, 77, 78, 91  
Étalon primaire CS2 99  
Étalons de fréquence des stations de radio 194  
Étalons primaires à césium 109, 228, 232  
Étalons primaires de fréquence 96, 97, 108, 113, 118, 119  
État fondamental 55  
État hyperfin 58, 59, 69, 102, 103  
Exactitude 43, 228
- F**
- Ferrel (William) 26  
Fontaine à césium 98, 105, 106, 211–213, 215, 217, 234  
Fuseau horaire 18, 19
- G**
- Galileo 233  
Gerlach (Walther) 69  
*Global Navigation Satellite System*, système global de navigation par satellite (GLONASS) 169, 171, 200, 232  
*Global Positioning System*, Système de positionnement global (GPS) 113–115, 169, 170, 172, 200–202, 232, 234  
GMT astronomique (GMAT) 20  
Gravimètre 195  
Gravity Probe A 187  
*Greenwich Mean Time* (GMT) 18–20, 77, 96, 122, 123, 181
- H**
- Hafele-Keating (expérience de) 186  
Halley (Edmond) 25, 136  
Hauteur des océans 201  
Heure d'été 21  
Heure de Greenwich (GMT) 158  
Heure GLONASS 171  
Heure GPS 170, 171, 230  
Heure légale 117, 122  
Horloge à ammoniac 61  
Horloge à fontaine à césium 218  
Horloge à jet de césium 94  
Horloge à quartz 49, 73, 180  
Horloge à rubidium 111, 195  
Horloge atomique 51, 56, 66, 91  
Horloge atomique embarquée sur un satellite 177  
Horloge atomique secondaire 107, 232  
Horloge de Shortt 47, 180  
Horloge industrielle au césium 107, 108, 118  
Horloge ionique 223  
Horloge moyenne virtuelle 115  
Horloge parlante 167  
Horloge radio-pilotée 163, 198  
Hulse (Russel) 194  
Hydrogène 54, 56, 58
- I-J**
- Isotope 60  
Jet de césium 66, 68, 98  
Jets atomiques 54  
Jour sidéral 22, 23  
Jour solaire 14, 17, 23  
Jour solaire moyen 23, 26, 33, 36

**K**

Kelvin (Lord) 51  
 Kilogramme (définition du) 205  
 Kilogramme (redéfinition du) 204, 208  
 Kilogramme International 35, 36  
 Kirchhoff (Gustav) 51  
 Kush (Polykarp) 66, 67

**L**

Laboratoire Primaire du Temps et des  
 Fréquences (LPTF) 106, 219  
 Lageos 134, 219  
 Laplace (Pierre-Simon de) 25  
 Levine (Martin) 187  
 Ligne à haute tension 196  
 Ligne Internationale de Changement  
 de date 19  
*Long Now* 210  
 Lunakhod 1 et 2 133  
 Lune (distance de la) 133  
 Lyons (Harold) 61, 64, 66

**M**

Marées 26, 27, 29, 137, 141  
 Markowitz (William) 78, 83, 91  
 Maser à hydrogène 91, 107, 110, 111,  
 114, 187, 199  
 Mélasse optique 216  
 Mercure 222, 228  
 Méridien 13, 14, 23  
 Méridien de Greenwich 128  
 Métaux alcalino-terreux 222  
 Métaux alcalins 57-58, 111  
 Mètre (définition du) 204, 205  
 Mètre international 35  
 Micro-ondes 59, 61, 51, 69, 70-72, 105  
 Midi 13, 14  
 Moment cinétique de la Terre 28  
 Mouvement des pôles 30

**N**

*National Bureau of Standards*, bureau  
 national de métrologie américain  
 (NBS) 61, 69, 87  
*National Institute of Standards &  
 Technology* (NIST) 101, 177, 222  
*National Physical Laboratory*, bureau  
 de métrologie britannique (NPL)  
 66, 68, 69, 75, 80  
 Newcomb (Simon) 33, 38  
 Newton (Isaac) 31

**O**

Observations simultanées 162, 165,  
 172  
 Observatoire de Paris 96, 106, 115,  
 121, 234  
 Observatoire Royal de Greenwich 18,  
 158, 180, 181, 233  
 Oscillateur 42, 113

**P**

Parry (Jack) 67, 72  
 Pendule 44, 45  
 PHARAO (Projet d'Horloge  
 Atomique par Refroidissement  
 d'Atomes en orbite) 219  
 Phillips (William) 215  
 Photon 55  
*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*  
 (PTB) 99, 100  
 Pilotage des horloges atomiques 120  
 Pompage optique 98, 102, 103  
 Pound (Robert) 185  
 Précession 24, 30, 38  
 Précision 219  
 Pulsar 190-193, 234

## INDEX

### R

- Rabi (Isidor) 53, 66, 67, 69
- Ramsey (Norman) 69, 91, 110
- Rebka (Glen) 185
- Rebond post-glaciaire 137
- Réflecteurs laser 131, 132, 195, 220
- Refroidissement Doppler 214, 216, 217
- Relativité (théorie de la) 174, 184–186, 188, 190, 192, 193, 207, 220
- Rotation terrestre (fluctuations de la) 29, 30, 136
- Rotation terrestre (irrégularité de la) 30, 47
- Rotation terrestre (ralentissement de la) 26–29, 80
- Rotation terrestre (variations aléatoires de la) 138
- Rotation terrestre (variations saisonnières de la) 140, 141, 241
- Rubidium 58, 111

### S

- Seconde 21, 31, 33, 36, 37, 39, 71, 86, 89
- Seconde intercalaire 97, 118, 125, 143–145, 148, 170, 181, 229, 230, 238
- Seconde SI 38, 90, 91, 96, 97, 148, 229
- Seconde TAI 229
- Seconde TE 90
- Seconde UT1 148
- Seconde UT2 90
- Sélection optique des états 104
- Service International de la Rotation Terrestre (IERS) 96, 125, 143, 144, 146, 232, 234
- Shapiro (Irwin) 189
- Signaux horaires 114, 161, 163
- Signaux horaires radiodiffusés 89

- Signaux horaires UTC 161
- Sodium 51, 60
- Stabilité 43, 110, 111, 116, 219, 228, 232
- Stern (Otto) 69
- Strontium 222–226
- Structure hyperfine 58
- Système International d'unités (SI) 37, 39

### T

- Tanlaw (Lord) 123
- Taylor (Joe) 194
- Temps atomique 76, 79, 88
- Temps Atomique International (TAI) 95–97, 110, 113, 118, 141–144, 146, 175, 177, 228, 234
- Temps des Éphémérides 31, 32, 37, 38, 75, 76, 82, 83, 86, 95, 136, 148
- Temps sidéral 21, 23, 24, 127
- Temps sidéral local (LST) 23
- Temps solaire moyen 17, 18–20, 23
- Temps universel (UT) 19, 21, 23, 24, 76, 122, 148
- Temps Universel Coordonné (UTC) 89, 95, 90, 96, 97, 110, 118, 119, 122, 123, 126, 144, 171, 180, 181, 228, 229, 231, 232
- Topex-Poséidon* 201
- Transfert de temps à sens unique 152, 154
- Transfert de temps par aller-retour 154, 155, 168, 173, 220
- Transfert de temps par observation simultanée 155, 156
- Transfert d'heure 172
- Transit 127, 136
- Transition hyperfine 67, 102, 212, 128, 222, 223
- Tremblement de terre 196
- Tube photographique zénithal 79, 129

**U**

Union Astronomique Internationale  
(UAI) 20, 33, 37, 38, 76, 96  
Union Internationale des  
Télécommunications (UIT) 95, 199  
*United States Naval Observatory*,  
Observatoire naval des États-Unis  
(USNO)  
UT0 (*Universal Time 0*, Temps  
Universel 0) 78, 80, 121, 160, 168,  
231, 234  
UT1 (*Universal Time 1*, Temps  
Universel 1) 77, 96, 126, 127,  
142–144, 146, 229  
UT1–UTC 146  
UT2 (*Universal Time 2*, Temps  
Universel 2) 77, 80, 89, 122  
UTC local 115, 117, 119, 122  
UTC mondial 122

**V**

Variations de la durée du jour 142  
*Very Long Baseline Interferometry*,  
Interférométrie à très grande base  
(VLBI) 130, 131, 199, 200  
Vessot (Robert) 187  
Viking 189  
Vitesse de la lumière 204

**Y-Z**

Ytterbium 222, 224, 227  
Zacharias (Jerrold) 66, 87, 104–106

# Table des matières

Préface	3
Introduction	9
1. Le temps des astronomes	11
2. Le temps des physiciens	41
3. Le temps atomique	75
4. Un temps planétaire	93
5. Les secondes intercalaires	125
6. Le partage du temps	151
7. Une heure précise : pour qui, pourquoi ?	183
8. L'avenir du temps	209
Appendice	236
Liste des sigles	245
Index	250