

*Journée scientifique 2000
du Bureau des longitudes*



Temps & Calendriers

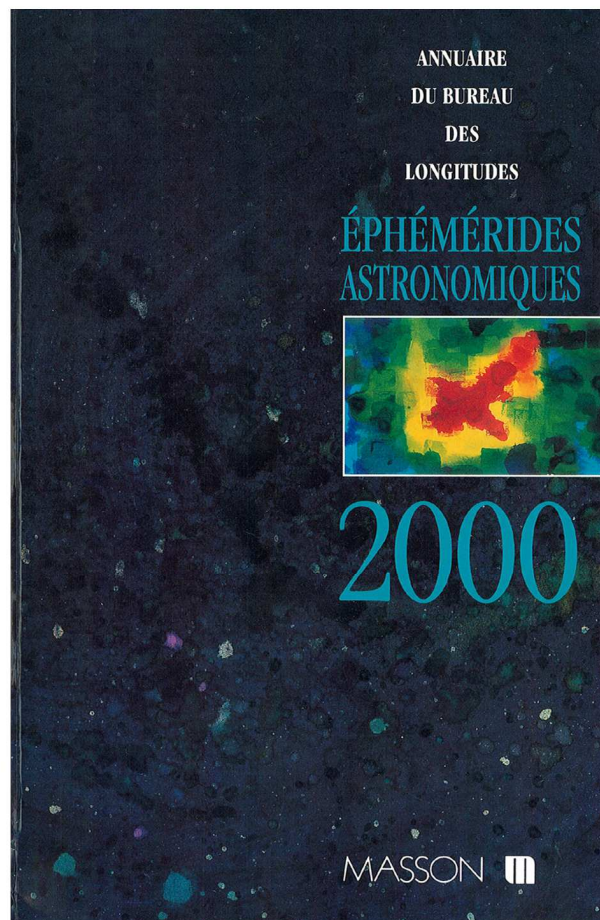
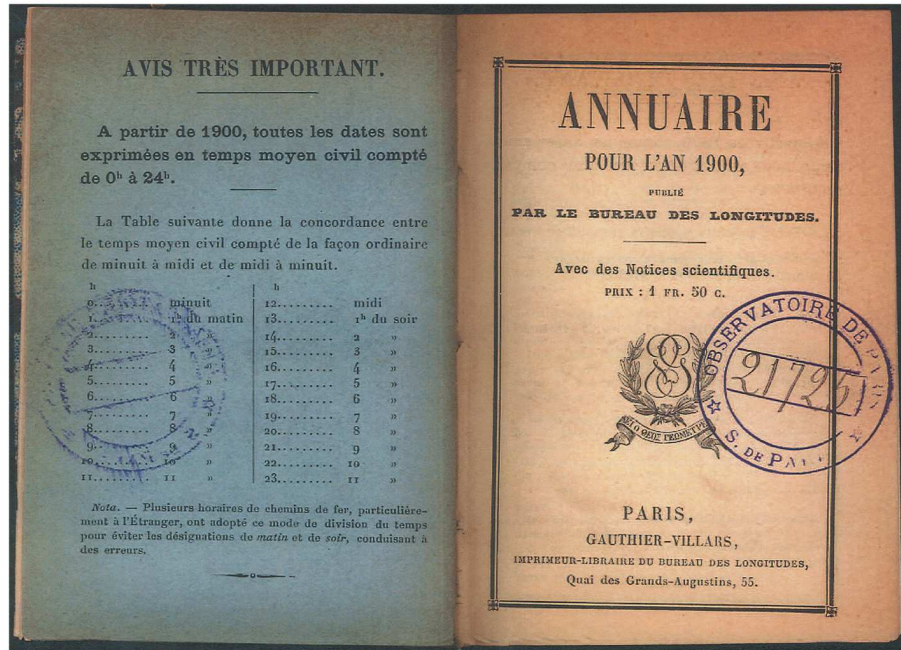
**Reproduction interdite – Tous droits réservés
Bureau des longitudes**

*En couverture : Fontaine atomique du BNM-LPTF à l'Observatoire de Paris
Copyright BNM-LPTF, Observatoire de Paris*

Temps & Calendriers

(calendriers, chronologies, mesure du temps)

Paris, 20 juin 2000



Avant –Propos

Le Bureau des longitudes a organisé, en juin 2000, une Journée scientifique intitulée "Temps et calendriers", au cours de laquelle six conférenciers ont présenté des exposés portant sur les calendriers, la chronologie et la mesure du temps. A l'époque, il avait été prévu de réunir l'ensemble de ces conférences sous forme d'une publication du Bureau des longitudes et les conférenciers avaient accepté de préparer dans ce but un texte correspondant à leur conférence. Les textes ont été fournis par les auteurs dans un délai raisonnable, mais, du fait de circonstances et de raisons diverses, ce projet de publication n'a malheureusement pas abouti.

Etant donné l'intérêt scientifique et historique de l'ensemble des sujets traités lors de cette Journée, ainsi que de la qualité des textes collectés, il a semblé important de valoriser l'apport de cette Journée. Les textes fournis par les auteurs à la suite de la Journée 2000 ont ainsi été réunis dans un recueil qui, avec l'accord des auteurs, constitue une publication électronique du Bureau des longitudes, mise à disposition sur son site web. Cette publication a été réalisée avec l'aide de Michel Tellier, actuel secrétaire administratif du Bureau des longitudes, qui en est ici remercié.

Certains thèmes traités dans ce recueil (notamment ceux portant sur les performances des horloges atomiques, sur le TAI et sur le programme ACES), ont évolué de façon spectaculaire depuis dix ans. Toutefois, le choix a été fait de n'apporter aucune mise à jour (à part les adresses des sites données en page 20, mises à jour de façon à permettre leur accès facile), mais de conserver les textes dans leur état original. Il n'est donc pas question de considérer ce recueil comme étant une publication actuelle, ce qui aurait nécessité une importante refonte. Cette publication électronique doit plutôt être considérée comme un témoignage écrit de la Journée 2000 du Bureau des longitudes, donnant l'état, en 2000, des connaissances et des recherches sur un thème qui est toujours de grande actualité.

Nicole Capitaine
Présidente du Bureau des longitudes
décembre 2010

TABLE DES MATIERES

<i>Préface</i> par Nicole CAPITAINE, Présidente du Bureau des longitudes	7
<i>Les calendriers</i> par Patrick ROCHER, IMCCE, Observatoire de Paris	9
<i>Les chronologies en Science de la Terre</i> par Vincent DEPARIS, LGIT, Observatoire de Grenoble	21
<i>Les horloges atomiques à refroidissement d'atomes</i> par Philippe LAURENT, Observatoire de Paris	27
<i>Le Temps Atomique International</i> par Bernard GUINOT, Observatoire de Paris et Bureau des longitudes	37
<i>Horloges dans l'espace et applications à la physique fondamentale : le projet ACES</i> par Noël DIMARCQ, Laboratoire de l'Horloge Atomique, <i>et al.</i>	43
<i>La chronologie selon Newton</i> par Michel LEFEBVRE, CNES	51

PRÉFACE

Le Bureau des longitudes a choisi, en 2000, de consacrer sa Journée scientifique au sujet "Temps et Calendriers" et, plus précisément, aux thèmes des calendriers, des chronologies et de la mesure du temps.

Ce choix montre l'importance accordée par le Bureau des longitudes à ces divers aspects du temps. La définition d'échelles de temps, la mesure du temps, la chronologie sont des thèmes fondamentaux pour l'astronomie en général et, plus particulièrement, pour le calcul et l'utilisation des éphémérides astronomiques. Ces thèmes concernent donc tout particulièrement le Bureau des longitudes, qui, depuis sa création, le 7 Messidor an III du calendrier républicain, a, pour une de ses missions, la publication d'éphémérides astronomiques. Actuellement, de telles éphémérides, "Annuaire du Bureau des longitudes", "Connaissance des Temps", "Éphémérides nautiques", sont réalisées à l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE), sous la responsabilité scientifique du Bureau de longitudes. Les thèmes scientifiques du temps et de la chronologie sont ainsi largement discutés au cours des séances ordinaires du Bureau des longitudes qui ont lieu chaque mois.

Le Bureau des longitudes a, par ailleurs, une mission de diffusion de l'information scientifique auprès du public. A ce titre, il publie un certain nombre d'ouvrages, et organise, chaque année, une série de conférences mensuelles sur l'astronomie, la géophysique et la géodésie; elles ont lieu dans la salle Hugot du Palais de l'Institut, aimablement mise à notre disposition par l'Académie des Sciences avec laquelle le Bureau des longitudes a des relations privilégiées.

Depuis 1998, le Bureau des longitudes a entrepris, à l'initiative de son président de l'époque, Jean-Louis Le Mouél, d'organiser une demi-journée scientifique annuelle sur un thème d'actualité. La Journée scientifique 1998 a été consacrée à l'œuvre de Bouguer, savant du XVIII^{ème} siècle, à l'occasion de la célébration du tricentenaire de sa naissance. En 1999, la Journée scientifique du Bureau des longitudes a été consacrée aux éclipses, en raison de l'éclipse totale de Soleil, le 11 août 1999, qui était visible dans la partie nord de la France.

En cette année 2000, dernière année du XX^{ème} siècle, dernière année du deuxième millénaire, et, par ailleurs, à une époque où les progrès de la métrologie du temps et de la diffusion du temps sont tout à fait spectaculaires, il nous a semblé d'actualité, de consacrer, la Journée scientifique du Bureau des longitudes au thème du temps et nous avons donc invité un certain nombre d'orateurs, spécialistes de ces questions, à en parler le 20 juin.

Nicole Capitaine

Présidente du Bureau des longitudes 2000-2001

Les calendriers

Patrick ROCHER

*Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides,
Observatoire de Paris*

Introduction

Très tôt, l'homme s'est heurté à la problématique de la mesure et de la découpe du temps. Pour cela il utilisa les mouvements apparents directement observables sur Terre et dans le ciel. L'observation des levers et des couchers du Soleil donna naissance à la notion de jour, la répétition des phases lunaires et le retour des saisons furent à l'origine du mois et de l'année. Pour maintenir les fêtes et cérémonies religieuses aux mêmes époques, il se trouva confronté au problème de concilier et d'accorder les périodes du jour, du mois lunaire et de l'année solaire.

Ces deux périodes, la lunaison et l'année tropique (retour des saisons) donnèrent naissance aux trois types de calendrier astronomique classique qui s'y rattachent : les calendriers solaires (les calendriers julien et grégorien), les calendriers lunaires (le calendrier musulman) et les calendriers luni-solaires (le calendrier israélite).

Les différentes approches pour la construction des calendriers

Les calendriers d'observations

Ces calendriers sont construits au jour le jour. Les débuts du mois lunaire ou de l'année solaire sont déterminés par l'observation directe des phénomènes servant à définir le mois (pleine Lune ou nouvelle Lune) ou l'année (passage du Soleil dans la direction d'un équinoxe ou d'un solstice). Ces calendriers sont par nature des calendriers locaux et souffrent des imprécisions liées à l'observation. De plus ne pouvant prédire les phénomènes ils ne permettent pas de se projeter dans le futur. C'est le cas par exemple du calendrier musulman religieux qui est un calendrier lunaire basé sur la visibilité et l'observation du premier croissant de Lune.

Les calendriers perpétuels

Ces calendriers sont construits à l'aide de relations arithmétiques plus ou moins complexes utilisant les valeurs moyennes de la lunaison (mois lunaire) et de l'année tropique (année solaire). Ces calendriers ne sont jamais en accord parfait avec l'observation des phénomènes vrais, mais suivent avec une bonne précision et sur de longues périodes de temps la lunaison moyenne et l'année tropique moyenne. Ces calendriers ne sont pas des calendriers locaux et ils permettent de se projeter dans le futur sur des périodes de temps relativement longues sans dérives importantes par rapport aux phénomènes. Depuis l'antiquité, la plupart des calendriers occidentaux sont de ce type. C'est le cas des calendriers lunaires grecs, des calendriers solaires romains (calendrier julien, puis grégorien) et du calendrier luni-solaire juif.

Les calendriers astronomiques

Ces calendriers sont construits à l'aide des théories mathématiques des mouvements de la Lune et du Soleil. Ils utilisent la prédiction des durées exactes de la lunaison vraie et de l'année tropique vraie. Ce sont des calendriers locaux, calculés pour des lieux particuliers. Ils sont théoriquement les plus précis, mais souffrent de la complexité et la diversité des théories. Certains de ces calendriers utilisent les mouvements sidéraux de la Lune et du Soleil à la place de la lunaison et de l'année tropique. Les calendriers religieux orientaux, indien et chinois, sont de ce type.

Précision et valeurs de l'année tropique

Notre calendrier, le calendrier grégorien, est un calendrier perpétuel solaire. La longueur moyenne de son année tente donc d'approcher la valeur de l'année tropique moyenne. La valeur de l'année tropique moyenne n'est pas constante mais varie très lentement au cours du temps. Les éléments suivants permettent d'évaluer cette évolution en fonction des échelles de temps choisies.

La durée moyenne de l'année se calcule à partir de la longitude moyenne tropique de la Terre. La longitude moyenne tropique est calculée à l'aide de la longitude moyenne rapportée à l'écliptique et l'équinoxe de l'époque, par exemple J2000, et de la précession des équinoxes. La meilleure solution actuelle pour la longitude moyenne rapportée à l'écliptique et l'équinoxe J2000 est la solution de X. Moisson (2000) :

$$\lambda = 1,75346994632 + 6283,0758504457 t - 9,8033 \times 10^{-6} t^2 + 18,7 \times 10^{-9} t^3 + 7,3 \times 10^{-9} t^4 - 2,3 \times 10^{-9} t^5$$

La meilleure solution actuelle pour la précession en longitude est donnée dans Bretagnon *et al.* (1998) :

$$p = 0,2438016495 t + 539,3230 \times 10^{-6} t^2 + 373,3 \times 10^{-9} t^3 - 1138,3 \times 10^{-9} t^4 - 8,6 \times 10^{-9} t^5$$

où t est le temps terrestre compté en milliers d'années juliennes (365250 ans) à partir de l'époque J2000 (jour julien 2451545).

On déduit de ces deux expressions la longitude moyenne tropique de la Terre :

$$\begin{aligned} L(t) &= \lambda + p \\ &= 1,75346994632 + 6283,319652095 t + 529,520 \times 10^{-6} t^2 \\ &\quad + 0,392 \times 10^{-6} t^3 - 1,131 \times 10^{-6} t^4 - 0,011 \times 10^{-6} t^5 \end{aligned}$$

Par dérivation de cette expression, on obtient la fréquence de la Terre dans sa révolution autour du Soleil et ainsi sa période en jours est donnée par :

$$P(t) = 365,2421905166 - 61,5607 \times 10^{-6} t - 68,4 \times 10^{-9} t^2 + 263,0 \times 10^{-9} t^3 + 3,2 \times 10^{-9} t^4$$

Cette expression de la période de révolution de la Terre est exprimée en temps terrestre, c'est-à-dire dans un temps uniforme ayant la même vitesse que le Temps atomique international. En fait, la durée de l'année est observée dans un temps lié à la rotation de la terre, le Temps universel u .

Si on utilise la relation suivante entre le temps terrestre t et le temps universel u

$$t - u = 64,184s + 1004,74s t + 3250s t^2$$

on obtient :

$$t = u + 2,03387 \times 10^{-9} + 31,83829 \times 10^{-9} t + 102,986 \times 10^{-9} t^2$$

où tous les temps sont exprimés en milliers d'années juliennes.

Dans cette échelle de temps, la période de révolution de la Terre exprimée en jours solaires moyens est :

$$P(u) = 365,2421788880 - 136,7906 \times 10^{-6} u - 68,3 \times 10^{-9} u^2 + 263,0 \times 10^{-9} u^3 + 3,2 \times 10^{-9} u^4$$

C'est cette dernière expression qui doit être utilisée pour calculer la valeur de l'année tropique moyenne dans le passé. Dans le futur, l'évolution des écarts entre le Temps terrestre et le Temps universel étant difficilement estimable sur de longue période de temps, il est tout à fait illusoire de vouloir construire un calendrier tenant compte de l'évolution de ces écarts.

Notre calendrier, le calendrier grégorien

Il est issu d'un calendrier plus ancien le calendrier julien, instauré par Jules César. Pour bien comprendre sa structure et ses origines il convient donc de retracer rapidement l'histoire des calendriers romains.

Les calendriers romains

Les Romains ont utilisé plusieurs origines pour compter les années. L'ère de la fondation de Rome (AUC : *Ab Urbe Condita*), créée par Varron, se basait sur la légende de la fondation de Rome par Romulus et Rémus et débutait le 21 avril 753 av. J.C. dans la 3^e année de la 6^e Olympiade¹.

Les Romains, à l'origine, ont utilisé un calendrier lunaire de dix mois, ayant alternativement 30 et 29 jours.

<i>Nom du mois</i>	<i>Nombre de jours</i>	<i>Origine du nom du mois</i>
Martius	30 jours	Mars (dieu de la guerre)
Aprilus	29 jours	<i>Aprilem</i> (le second) ou <i>aperire</i> (ouvrir)
Maius	30 jours	Maia (mère de Mercure) ou Maïus (dieu de la croissance)
Junius	29 jours	Junon (fille de Saturne, épouse de Jupiter)
Quintilis	30 jours	5 ^e mois
Sextilis	29 jours	6 ^e mois
September	30 jours	7 ^e mois
October	29 jours	8 ^e mois
November	30 jours	9 ^e mois
December	29 jours	10 ^e mois

Tableau 1 : Le calendrier lunaire romain.

L'année comportait donc 295 jours.

À ce calendrier va succéder un calendrier de 304 jours portant le nom de calendrier de Romulus, personnage légendaire fondateur de Rome, fils de Mars et de la déesse Rhéa. Les quatre mois de 31 jours étaient appelés mois pleins (*plenimenses*) et les mois de 30 jours étaient appelés mois caves (*cavimenses*). L'existence de ce calendrier, tout comme Romulus, est vraisemblablement une légende, en effet ce calendrier ne suivait ni la Lune ni le Soleil et présentait donc peu d'intérêt.

<i>Nom du mois</i>	<i>Nombre de jours</i>	<i>Origine du nom du mois</i>
Martius	31 jours	Mars (dieu de la guerre)
Aprilus	30 jours	<i>Aprilem</i> (le second) ou <i>aperire</i> (ouvrir)
Maius	31 jours	Maia (mère de Mercure) ou Maïus (dieu de la croissance)
Junius	30 jours	Junon (fille de Saturne, épouse de Jupiter)
Quintilis	31 jours	5 ^e mois
Sextilis	30 jours	6 ^e mois
September	30 jours	7 ^e mois
October	31 jours	8 ^e mois
November	30 jours	9 ^e mois
December	30 jours	10 ^e mois

Tableau 2 : Le calendrier dit de Romulus.

¹ L'ère des Olympiades a été introduite par l'historien Timée (III^e siècle av. J.C.) à partir d'une liste des vainqueurs des jeux Olympiques.

Il est plus vraisemblable que l'on soit passé directement du calendrier lunaire de 10 mois au calendrier solaire de 12 mois, connu sous le nom de calendrier de Numa (Numa Pompilius, v. 715 –v. 672 av. J.C.) ou de Tarquin (Tarquin l'Ancien, 5^e roi de Rome, mort vers 578 av. J.C.). Les mois comportaient 29 et 31 jours, les nombres pairs étant considérés comme néfastes.

Nom du mois	Nombre de jours	Origine du nom du mois
Martius	31 jours	Mars (dieu de la guerre)
Aprilus	29 jours	<i>Aprilem</i> (le second) ou <i>aperire</i> (ouvrir)
Maius	31 jours	Maia (mère de Mercure) ou Maïus (dieu de la croissance)
Junius	29 jours	Junon (fille de Saturne, épouse de Jupiter)
Quintilis	31 jours	5 ^e mois
Sextilis	29 jours	6 ^e mois
September	29 jours	7 ^e mois
October	31 jours	8 ^e mois
November	29 jours	9 ^e mois
December	29 jours	10 ^e mois
Februarius	28 jours	Februo (dieu des morts)
Januarus	29 jours	Janus (dieu à deux têtes)

Tableau 3 : le calendrier de Numa.

En 450 av. J.C. les Décemvirs déplacèrent le mois de Februarius après le mois de Januarus. L'année était de 355 jours et il manquait 10 jours pour avoir une année solaire de 365 jours. Pour remédier à ce problème les romains intercalèrent un mois supplémentaire tous les deux ans.

Le mois supplémentaire, appelé *Mercedonius*² (mois où l'on payait les mercenaires), comportait 22 ou 23 jours et était placé entre le 23 et le 24 Februarius ou entre le 24 et le 25 Februarius. Dans ce cas le 23 ou le 24 Februarius devenait le dernier jour du mois (fêtes de Regifugium le 23 et de Terminalia le 24), le mois intercalaire commençait le lendemain et on y ajoutait les 5 ou 4 derniers jours du mois de Februarius. On avait donc sur une période de quatre ans : une année de 355 jours, puis une année de 377 jours (355 -5 + 27), puis de nouveau une année de 355 jours et enfin une année de 378 jours (355 -4 + 27). Soit un total de 1465 jours. Ce système n'était pas exact, il présentait un excès de quatre jours par rapport au retour des saisons. On envisagea alors, sur une période de 24 ans, une répartition complexe des années comportant un mois supplémentaire.

Ce cycle de 24 ans porte le nom de cycle Mercédonien.

An	Durée de l'année	Durée de Mercedonius	Cumul des jours	An	Durée de l'année	Durée de Mercedonius	Cumul des jours
1	355j		355j	13	355j		4750j
2	377j	22j	752j	14	377j	22j	5127j
3	355j		1087j	15	355j		5482j
4	378j	23j	1465j	16	378j	23j	5860j
5	355j		1820j	17	355j		6215j
6	377j	22j	2197j	18	377j	22j	6592j
7	355j		2552j	19	355j		6947j
8	378j	23j	2930j	20	377j	22j	7324j
9	355j		3285j	21	355j		7679j
10	377j	22j	3662j	22	377j	22j	8056j
11	355j		4017j	23	355j		8411j
12	378j	23j	4395j	24	355j		8766j

Tableau 4 : le cycle Mercédonien.

² Les auteurs anciens désignent aussi ce mois simplement par l'expression mois intercalaire (*mensis intercalaris*).

Au cours de ce cycle, on remplaçait un mois Mercedonius de 23 jours par un mois de 22 jours et on supprimait le dernier mois de 23 jours. On obtenait ainsi une longueur moyenne de l'année de 365,25 jours, valeur proche de la révolution tropique moyenne.

Ce cycle trop complexe n'a jamais été correctement appliqué. Le législateur confia aux pontifes (*pontifex maximus*) le soin de décider l'intercalation et de la longueur du mois supplémentaire. Les pontifes, notamment après l'adoption de la loi acilienne de 563 AUC (191 av. J.C.) rétablissant leur toute puissance, utilisèrent cette prérogative pour raccourcir ou prolonger les magistratures. Il s'ensuivit un décalage de plus en plus grand entre le calendrier et les saisons.

Au moment de la réforme du calendrier par Jules César, en l'an 708 AUC (46 av. J.C.), l'écart entre le calendrier et les saisons était de - 90 jours.

La structure du mois romain

Avant de décrire la réforme julienne du calendrier, il convient de décrire plus précisément la structure du mois romain et la manière dont les romains numérotaient les jours. Le mois romain ne comportait pas de semaines, mais un système de huit lettres, les lettres *nondinales*, allant de A à H. permettant de repérer la succession des jours dans le mois. Au début de chaque année un responsable choisissait une lettre *nondinale* correspondant au jour du marché. Le mois était divisé en trois parties inégales séparées par trois fêtes : les calendes (*calendae*) le premier jour du mois, les nones (*nonae*) le 5^e ou le 7^e jour (suivant le mois) et les ides (*ides*) huit jours plus tard (le 13^e ou 15^e jour du mois). Le décompte des jours se faisait dans le sens rétrograde, d'après leur distance à ces trois fêtes, et cela d'une manière inclusive en comptant le jour de départ et le jour d'arrivée. Ainsi le jour de la fête portait le numéro un, le jour précédent s'appelait la veille (*pridie*), mais l'avant-veille se désignait par le troisième jour avant la fête (*ante diem III*). L'expression *ante diem* était placée devant le numéro d'ordre du jour, d'où l'abréviation *ad³* figurant dans les calendriers. La lettre *nondinale* était suivie d'une lettre ou d'une série de lettres indiquant le type du jour. On trouve les abréviations suivantes : *F*, pour les jours fastes (*dies fasti*), où l'on pouvait rendre justice ; *N* pour les jours néfastes (*dies nefasti*), où l'on ne pouvait pas rendre justice ; *EN* pour les jours *entrecoupés* (*dies intercesi*) dont une partie était faste et l'autre néfaste. Lorsque la première moitié était néfaste et la seconde faste (ou réciproquement) les abréviations deviennent *NF* et *FP* (*nefastus primo* et *fastus primo*). La lettre *C* désigne les jours de Comices (*dies comitiales*) pendant lesquels le peuple pouvait se réunir pour s'occuper des affaires publiques et voter.

La réforme julienne

La réforme du calendrier par Jules César en l'an 708 de la fondation de Rome (AUC) comporte plusieurs étapes. Elles consistaient à rattraper le retard pris par l'ancien calendrier par rapport aux saisons, puis à modifier la structure du calendrier de manière à supprimer sa dérive par rapport à l'année tropique moyenne. Pour réaliser cette réforme, Jules César a suivi les conseils d'un astronome grec d'Alexandrie Sosigène.

Le rattrapage du retard sur les saisons s'est fait en trois étapes :

- L'année 707 AUC fut la dernière du calendrier de Numa avec un mois intercalaire de 23 jours et compta 378 jours du 1^{er} Martius au 27 Mercedonius.
- L'année 708 AUC (année de la confusion) a eu 365 jours du 1^{er} Martius au 29 December avec deux mois intercalaires supplémentaires entre November et December ; un mois de 33 jours (*intercalis prior*) et un mois de 34 jours (*intercalis posterior*). C'est la dernière année à commencer au mois de Martius.
- L'année 709 AUC commença le 1^{er} Januarus et est la première année du calendrier julien. Elle est bissextile (366 jours).

L'équinoxe de printemps tombait selon Sosigène le 25 Martius (en réalité le 23 mars à 13h 08m UT).

La suppression de la dérive par rapport aux saisons est obtenue en utilisant sur un cycle de quatre ans, trois années communes de 365 jours et une année bissextile de 366 jours. La valeur moyenne de l'année calendaire est donc de 365,25 jours. L'année de 366 jours était obtenue en doublant un jour de Februarus. Ce jour étant le sixième jour avant les calendes de Martius (*Ante diem sextum calendas Martias*),

³ À ne pas confondre avec l'abréviation A.D. (*Anno Domini*).

le jour intercalaire prit le nom *de Ante diem bis sextum calendas Martias* qui est à l'origine du terme bissextile.

Remarques :

L'année 709 AUC est la première année bissextile, donc dans le décompte des années depuis l'ère de la fondation de Rome, les années dont le millésime moins un est divisible par quatre sont bissextiles.

Comme le signale Paul Couderc (1946), « l'épithète bissextile est réservée à l'année. Le jour additionnel est le bissexté, substantif peu employé ; l'usage consacre l'expression (incorrecte) de jour bissextile ».

L'expression année bissextile (*annus bissextilis*) pour désigner l'année de 366 jours ne date pas de l'époque de César, on ne la rencontre pratiquement pas dans les écrits antérieurs à Bède le Vénérable (VIII^e siècle).

On trouve souvent dans la littérature que l'année de la confusion comporta 445 jours, ce qui est inexact, en réalité c'est la magistrature consulaire de César et Lépide qui s'étend du 1^{er} Januarius 707 au 29 December 708 et qui dura effectivement 445 jours : 80 jours en 707 [Januarius (29j), Februarius (24j) et Mercedonius (27j)] et 365 jours en 708.

Après la réforme julienne le calendrier romain avait dont la structure suivante :

Nom du mois	Nombre de jours	Origine du nom du mois
Januarius	31 jours	Janus (dieu à deux têtes)
Februarius	28-29 jours	Februo (dieu des morts)
Martius	31 jours	Mars (dieu de la guerre)
Aprilus	30 jours	<i>Aprilem</i> (le second) ou <i>aperire</i> (ouvrir)
Maius	31 jours	Maia (mère de Mercure) ou Maïus (dieu de la croissance)
Junius	30 jours	Junon (fille de Saturne, épouse de Jupiter)
Julius	31 jours	5 ^e mois
Sextilis	31 jours	6 ^e mois
September	30 jours	7 ^e mois
October	31 jours	8 ^e mois
November	30 jours	9 ^e mois
December	31 jours	10 ^e mois

Tableau 5 : le calendrier julien.

Jules César fut assassiné aux ides de Martius de l'année suivante (15 mars 710 AUC). Il fut remplacé comme consul par P. Cornelius Dolabella. Le jour de ses funérailles, Marc Antoine, avec l'aide du nouveau Pontifex Maximus M. Lepidus instaura le processus de divinisation de César et proposa au Sénat de rebaptiser Julius le mois de Quintilis.

À la suite de la mort de César, les Pontifes en charge du calendrier vont mal appliquer la réforme julienne en intercalant une année bissextile tous les trois ans à la place de tous les quatre ans. La confusion venait probablement de la pratique de dénombrement inclusif utilisée par les romains. Cette erreur a été commise durant une période de 36 ans, les années 712, 715, 718, 721, 724, 727, 730, 733, 736, 739, 742 et 745 AUC furent donc bissextiles. Donc sur cette période de 36 ans on compta 12 années bissextiles à la place de 9. En 746 AUC, Auguste s'aperçut de cette erreur et la corrigea en supprimant les années bissextiles pendant 12 ans, les années 749, 753 et 757 furent donc communes et le cycle des années bissextiles reprit en 761 AUC. Pour remercier Auguste, le Sénat proposa de nommer Augustus le mois Sextilis.

Nom du mois	Nombre de jours	Origine du nom du mois
Januarus	31 jours	Janus (dieu à deux têtes)
Februarius	28-29 jours	Februo (dieu des morts)
Martius	31 jours	Mars (dieu de la guerre)
Aprilus	30 jours	<i>Aprilem</i> (le second) ou <i>aperire</i> (ouvrir)
Maius	31 jours	Maia (mère de Mercure) ou Maïus (dieu de la croissance)
Junius	30 jours	Junon (fille de Saturne, épouse de Jupiter)
Julius	31 jours	En hommage à César
Augustus	31 jours	En hommage à Auguste
September	30 jours	7 ^e mois
October	31 jours	8 ^e mois
November	30 jours	9 ^e mois
December	31 jours	10 ^e mois

Tableau 6 : le calendrier julien après 761 AUC.

On retrouve la structure du calendrier actuel.

Précision et dérive du calendrier julien.

Il y a vingt siècles la valeur exacte de l'année tropique moyenne était de 365,2448914 jours, à l'époque de la réforme julienne, la valeur connue était celle observée par Hipparque (365j 5h 55m ~ 365,24653 jours), l'adoption d'une année bissextile tous les 4 ans donnait à l'année calendaire une longueur moyenne de 365,25 jours. Cette valeur est un peu plus longue que l'année tropique moyenne. L'écart d'environ 7 minutes par an semble insignifiant à l'échelle d'une vie humaine, mais il va, au cours des siècles, entraîner une dérive de la date des saisons dans le calendrier. La date de l'équinoxe de printemps, va donc lentement dériver vers le début du mois de Martius. Cette dérive nécessita une nouvelle réforme du calendrier. Elle fut l'œuvre du Pape Grégoire XIII en 1582, et fut incluse dans une réforme plus large modifiant le comput de la date de Pâques.

Le comput pascal, l'introduction de l'ère chrétienne dans le calendrier julien.

Le comput pascal

Après la mort du Christ, les premiers chrétiens prirent l'habitude de célébrer sa résurrection. Certains chrétiens célébraient cette fête le jour même de la Pâque juive, d'autres trois jours plus tard et d'autres enfin, le dimanche suivant. La Pâque juive est liée au calendrier juif (un calendrier de type luni-solaire) et tombe toujours le soir du 14^e jour du mois de Nissan⁴ jour de la pleine Lune suivant l'équinoxe de printemps (pour les juifs c'est le 15 Nissan, le jour juif commençant le soir). En l'an 325 le premier concile œcuménique réuni à Nicée décida d'uniformiser la date de Pâques chrétienne et de s'affranchir du calendrier juif. Pâques fut donc fêté le dimanche qui suit le 14^e jour de la Lune qui atteint cet âge au 21 mars ou immédiatement après. Cette définition, un peu complexe peut se traduire de la façon suivante : Pâques est le premier dimanche qui suit la première pleine Lune de printemps, l'équinoxe de printemps étant fixé au 21 mars⁵. Comme on le voit cette définition est liée à la Lune et au Soleil, donc à un comput luni-solaire. On remarque également que la date de l'équinoxe de printemps avait glissé du 25 mars au 21 mars en un peu plus de trois siècles et demi. Le concile de Nicée donna une définition de la date de Pâques, mais ne fournit aucune méthode pour son calcul. Les différents centres religieux (Alexandrie, Rome) vont créer des computs pascaux différents.

⁴ D'où le nom de quartodécimans donné aux chrétiens qui se basaient sur la date de la Pâque juive.

⁵ On n'a plus, hélas, le texte même du décret de Nicée concernant le règlement de la question pascale, on ne dispose que de trois témoignages : la lettre synodale adressée à l'église d'Alexandrie, la lettre circulaire de l'empereur Constantin aux évêques, à l'issue du concile, et deux passages des écrits de St-Athanase, témoin oculaire. Juste après le concile il y eut déjà des divergences entre Alexandrins et Romains sur la date de l'équinoxe les premiers la fixaient le 18 mars et les seconds le 21 mars.

Parfois les écarts entre ces computs étaient sans conséquences, et Pâques tombait le même jour dans les différents computs, mais parfois on arrivait à des désaccords importants, comme en 387, où les Alexandrins fêtèrent Pâques le 25 avril, les Romains le 18 avril et les Ariens de Gaules le 21 mars !

En 525 le moine scythe Denys le Petit, Dionysius Exiguus, (v 500 – 545) proposa un comput pour le calcul de la date de Pâques. La détermination des dates de pleine Lune dans le calendrier julien utilisait le cycle de Méton basé sur le fait que 235 lunaisons sont presque égales à 19 années tropiques.

Les tables pascales de ce comput (*Libellus de ratione Paschae*) utilisaient comme époque d'origine la date de naissance du Christ que Denys le Petit estima être le 25 décembre 753 AUC, quatrième année de la 194^e olympiade. Il proposa de compter également les années à partir de cette date et instaura ainsi l'ère chrétienne (AD *Anno Domini*). Pour la suite, les chronologistes décalèrent cette origine au premier janvier de l'an 754 AUC afin de la faire coïncider avec le début de l'année. Le comput pascal de Denys le Petit finit par s'imposer dans le monde chrétien, mais ne fut uniformément utilisé qu'à la fin du VIII^e siècle.

Le cycle Métonique utilisé dans ce comput ne suit pas parfaitement les phases lunaires, il introduit un décalage de l'ordre d'un jour tous les 308 ans. La date de Pâques va donc dériver dans le calendrier à la suite des imperfections du cycle métonique et du calendrier julien.

Le monde chrétien mit longtemps à trouver une solution à cette double dérive. De nombreuses réformes se heurtèrent au conservatisme, et parfois à l'incompétence, des autorités religieuses et il fallut attendre la fin de XVI^e siècle pour qu'une solution soit enfin adoptée.

La réforme grégorienne.

En 1582, la Lune pascale utilisée dans le comput avait dérivé de 3 jours par rapport à la Lune moyenne réelle, ce qui était énorme. La date de l'équinoxe de printemps avait dérivé de 10 jours et tombait le 10 mars.

Élu pape en 1572, Grégoire XIII (Ugo Boncompagni) mit en application la décision prise par le concile de Trente (1514 – 1585) de réformer le comput pascal, son nom restera lié à cette réforme et au calendrier qui en est issu⁶. Pour cela il réunit vers 1575 une commission composée de savants et d'esprits compétents. Il fit construire au Vatican la Galleria della Carte Geografiche (galerie des cartes), qui ressemblait à la tour des vents d'Athènes (nom qu'elle garda par la suite) et chargea l'astronome Ignazio Danti de fournir des instruments d'observations.

La réforme calendaire fut l'œuvre de deux hommes, le médecin italien Aloïsio Lilio (mort en 1576 mais représenté par son frère Antonio Lilio) et un astronome allemand, le jésuite Christopher Clavius.

La réforme va porter sur plusieurs points. Premièrement la correction des dérives constatées, puis une modification de la Lune pascale et du calendrier julien. Nous nous intéresserons ici uniquement à la réforme calendaire.

Il convenait de récupérer le décalage de 10 jours pour ramener la date de l'équinoxe de printemps au 21 mars, puis de modifier la répartition des années bissextiles de manière à supprimer trois années bissextiles sur une période de quatre siècles.

La réforme fut promulguée dans la bulle papale *Inter Gravissimas* du 24 février 1582⁷.

La suppression des dix jours se fit de la manière suivante : le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 julien fut le vendredi 15 octobre 1582 grégorien. La définition des années bissextiles dans le nouveau calendrier est la suivante : les années qui sont multiples de 4 sont bissextiles sauf celles qui sont multiples de 100 sans l'être de 400. Ainsi 1700, 1800 et 1900 sont des années communes et 1600 et 2000 sont des années bissextiles. La moyenne de l'année calendaire est alors de 365,2425 jours.

Remarques :

La commission a ramené la date de l'équinoxe au 21 mars, date de l'équinoxe imposée par le concile de Nicée, elle aurait pu choisir de ramener l'équinoxe à la date de l'équinoxe de printemps du début de l'ère chrétienne (23 mars) ou à la date de l'équinoxe de printemps à l'époque de la création du calendrier julien en 46 avant J.C. Des propositions furent même faites pour décaler les saisons de manière à faire coïncider le solstice d'hiver et le début de l'année. Le conservatisme religieux l'emporta de

⁶ Il est également connu pour avoir promulgué *l'Index librorum prohibitorum*, la liste des livres interdits parmi lesquels allait figurer en bonne place le *De revolutionibus* de Copernic.

⁷ Datée en réalité 1581, car les bulles pontificales suivent le style de l'Annonciation : l'année débute le 25 mars.

nouveau et c'est la date de Nicée (21 mars) qui fut retenue. Une des conséquences de ce choix est qu'il n'y a pas de coïncidence entre les deux calendriers pour l'origine d'ère chrétienne. Le premier jour du XXI^e siècle est le premier janvier de l'an 2001 (soit le jour julien 2451911), le premier jour de l'ère chrétienne est le premier janvier de l'an 1 (an 754 UAC, soit le jour julien 1721424) le nombre de jour écoulé entre ces deux dates est de 730487 jours, or vingt siècles grégoriens correspondent à 730485 jours, soit un déficit de deux jours. Pour avoir coïncidence, il aurait fallu supprimer 12 jours à l'année 1582 et ramener l'équinoxe de printemps au 23 mars.

La valeur moyenne de l'année calendaire (365,2425 jours) est encore un peu trop forte, et il faudra supprimer un jour dans environ 3000 ans si l'on veut conserver l'équinoxe de printemps au 21 mars. Mais les incertitudes sur l'évolution de la différence entre le temps terrestre et le temps universel ne nous permettent pas de dire quand cette correction sera nécessaire.

La réforme grégorienne tomba à une époque où l'autorité du pape était fortement contestée, par les protestants d'une part, mais également par les églises orthodoxes. Ainsi les pays catholiques répercutèrent rapidement la réforme calendaire et les pays protestants et orthodoxes mirent plus d'un siècle et demi pour l'adopter, sous le nom de calendrier julien réformé. Certaines églises orthodoxes continuent d'utiliser le comput julien et le calendrier julien pour le calcul et la célébration de leurs fêtes.

En France le calendrier grégorien a été instauré deux fois, une première fois sous Henri III, par l'ordonnance du 2 novembre 1582, le lendemain du 9 décembre 1582 julien fut le 20 décembre grégorien et une seconde fois sous l'empire, par le Sénatus-consulte du 22 Fructidor an XIII rétablissant l'usage du calendrier grégorien, à la place du calendrier républicain, à partir du premier janvier de l'an 1806.

Le début de l'année

Avant de conclure, il convient de préciser que de très nombreux styles furent en usage pour le début de l'année. Le tableau suivant en donne une liste non exhaustive :

<i>Style</i>	<i>Utilisateurs et époque</i>
Style 1 ^{er} mars	Romains avant la réforme de Jules César.
Style de printemps (21-22 mars)	Mérovingiens aux VI ^e et VII ^e siècles
Style de l'Annonciation (25 mars)	En Russie depuis le XI ^e siècle et jusqu'en 1725
Style de la Résurrection (nuit de Pâques)	Bulles pontificales
	En France sous Louis VI puis aux XII ^e et XIII ^e siècles (années de longueurs variables avec parfois deux mois d'avril !)
Style de l'Ascension	Utilisé à Alexandrie (mais pas en Occident)
Style grec le 1 ^{er} septembre	
Style Républicain (équinoxe d'automne)	Calendrier Républicain (1792 à 1806)
Style de la St Martin (11 novembre)	
Style de la nativité (25 décembre)	Église romaine sous Charlemagne, persista en France jusqu'au XI ^e siècle, en Bourgogne jusqu'au XIII ^e .
Style solstice d'hiver	Gaulois (calendrier de Coligny)
Style premier janvier (ou de la Circoncision)	En France depuis Charles IX (ordonnance dite du Roussillon, 1563).
	En Angleterre en 1752.

Réformes et normalisation

De nos jours, la totalité de la planète utilise le calendrier grégorien, tout au moins pour les transactions internationales, mais un grand nombre de pays conservent parallèlement un ou plusieurs calendriers pour des raisons religieuses ou culturelles.

Au cours du XIX^e et du XX^e siècle, des réformes du calendrier grégorien furent proposées. Son principal défaut est lié à l'incommensurabilité du cycle dominical (7 jours) avec la longueur du mois et de

l'année. Mais toutes les solutions proposées revenaient à introduire un ou plusieurs jours blancs (jour sans nom) qui rompaient le cycle de la semaine. Ces solutions furent rejetées par toutes les instances religieuses.

L'écriture et la définition de la date dans le calendrier ont fait l'objet d'une normalisation.

Voici la définition « officielle de la date » issue de la norme ISO 8601 1998 publiée par l'AFNOR (indice de classement Z69-200), paragraphe 5.2.1 :

« Dans les expressions de dates du calendrier

- le jour du mois (jour du calendrier) est représenté par deux chiffres. Le premier jour d'un mois quelconque est représenté par (01) et les jours suivants du même mois sont numérotés par ordre croissant ;
- le mois est représenté par deux chiffres. Janvier est représenté par (01) et les mois suivants sont numérotés par ordre croissant ;
- l'année est généralement représentée par quatre chiffres ; les années sont numérotées par ordre croissant à partir de l'an (0001). »

Comme on le voit dans ces définitions toutes les quantités débutent par un.

La date ne représente pas le temps écoulé depuis l'origine du calendrier mais le numéro ordinal du jour en cours, le numéro ordinal du mois en cours et le numéro ordinal de l'année en cours.

Ainsi la date 01/01/2000 signifie que l'on est le premier jour du premier mois de la 2000^e année et non pas qu'il se soit écoulé un jour un mois et 2000 ans depuis l'origine du calendrier.

Pour avoir une durée écoulée, il faut faire la différence entre deux dates, c'est ce que l'on fait lorsque l'on calcule son âge.

La confusion classique entre la date et le temps écoulé, provient du fait que ces deux entités utilisent une structure de forme très voisine. Lorsque l'on indique son âge on utilise une structure formée d'une succession de trois quantités, nombre de jours écoulés, nombre de mois écoulés et nombre d'années écoulées depuis sa naissance qui ressemble fortement à une date mais qui n'en est pas une. D'ailleurs la norme ISO 8601 (§ 5.5.3.2) recommande d'utiliser la notation suivante : P1998Y11M5D pour désigner par exemple une période de 1998 ans 11 mois et 5 jours. Cette notation évite donc toute confusion entre date du calendrier et durée.

La normalisation porte également sur le début et la numérotation des semaines. La semaine commence le lundi (jour numéroté 1). La première semaine de l'année, numérotée 1, est celle qui contient le premier jeudi de janvier. Les semaines sont numérotées de 1 à 52. On compte cependant une semaine numérotée 53 lorsque l'année considérée se termine un jeudi, ou bien un jeudi ou un vendredi si elle est bissextile.

Notation des années antérieures à l'ère chrétienne

Ils existent deux systèmes de notations pour les années antérieures à l'ère chrétienne.

La notation des historiens

Les historiens eurent envie de dater à l'aide du même calendrier les événements antérieurs et postérieurs à naissance du Christ. Ils prolongèrent donc le calendrier julien vers le passé en utilisant la notation « avant Jésus Christ ». L'an 753 AUC devint donc l'an 1 av. J.C., l'an 752 AUC l'an 2 av. J.C. et ainsi de suite. Cette notation présente deux inconvénients : les années bissextiles sont les années 1 av. J.C., 5 av. J.C., 9 av. J.C. et la règle de divisibilité par quatre n'est donc plus valable pour ces années ; de plus si l'on veut calculer le nombre d'années écoulées entre une date antérieure à la naissance du Christ et une date postérieure, on est tenté d'effectuer l'addition de ces deux dates et l'on commet ainsi une erreur. Bien que cette notation porte le nom de notation des historiens, il semble qu'elle ait été introduite par un astronome, en effet c'est l'astronome français Denis Petau qui l'utilisa (peut-être en premier) dans ces cours au collège de Clermont en 1627.

La notation des astronomes

Pour pallier les deux inconvénients de la notation des historiens, un autre astronome, Jacques Cassini, va introduire une nouvelle notation, elle sera utilisée pour la première fois dans les tables astronomiques de 1740. Cette notation consiste à introduire une numérotation des années antérieures à l'ère chrétienne avec des nombres relatifs négatifs. L'an 753, donc l'année 1 av. J.C. est numérotée zéro, l'année 2 av. J.C. est numérotée -1, l'année 3 av. J.C., -2 et ainsi de suite. Avec cette notation, la règle de divisibilité par quatre des années bissextiles reste valable, les années bissextiles sont les années 0, -4, -8...

Si l'on veut calculer le nombre d'années écoulées entre deux dates situées de part et d'autre du début de l'ère chrétienne, on peut effectuer une différence algébrique de ces deux dates. Par exemple entre l'an 3 après J.C et l'an -5, il s'est écoulé « $3 - (-5) = 3+5 = 8$ ans ».

On remarquera que cette notation qui introduit une année zéro ne modifie pas l'origine de l'ère chrétienne (c'est l'an 1 avant J.C. qui est numéroté zéro) et ne change donc pas le début du XXI^e siècle chrétien (01/01/2001) calculé à partir du 1^{er} janvier de l'an 1 (754AUC), origine de l'ère.

Malgré ses inconvénients la notation des historiens est majoritairement utilisée. Par contre on trouve assez souvent une utilisation mixte des deux notations, ce qui est une erreur, on doit écrire l'an 15 av. J.C. ou bien l'an -14, mais l'expression -15 av. J.C. n'a aucun sens.

En conclusion

De nos jours, le calendrier grégorien a perdu pratiquement toute connotation religieuse et bien qu'il ne soit pas parfait, il présente l'énorme avantage d'avoir été adopté par la totalité des états de la planète. De plus la généralisation de son utilisation dans les programmes informatiques et les coûts énormes qu'entraînerait toute modification, laisse penser que son usage va perdurer.

Bibliographie

Les ouvrages et articles sont donnés par date de parution.

- *Intégration du mouvement des planètes dans le cadre de la relativité générale*, 2000, X. Moisson, Thèse, IMCCE, **Paris**.
- *Rythmes du temps, Astronomie et calendrier*, 2000, Émile Biémont, **DeBoeck, Bruxelles**.
- *L'annuaire du Bureau des longitudes*, 2000, IMCCE, Bureau des longitudes, **Masson, Paris**.
- *Calendar, Humanity's Epic Struggle to Determine a True and Accurate Year*, 1998, David Ewing Duncan, **Avon Books, New York**.
- *La saga des calendriers ou le frisson millénariste*, 1998, E.G. Lefort, **Bibliothèque pour la Science, Paris**.
- *Mapping Times, The Calendar and its History*, 1998, E.G. Richards, **Oxford University Press**.
- *SMART97 : A new solution for the rotation of the rigid Earth*, P. Bretagnon *et al.*, 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 329, 329.
- *Calendrical Calculations*, 1997, Nachum Dershowitz and Edward M. Reingold, **Cambridge University Press**.
- *Histoire du calendrier de la liturgie à l'agenda*, 1996, Francesco Maiello, **Seuil, Paris**.
- *Calendriers et chronologie*, 1996, Jean-Paul Parisot et Françoise Suagher, **Masson, Paris**.
- *Éléments de données et formats d'échange – Échange d'information – Représentation de la date et de l'heure*, 1998, AFNOR ISO 8601 : 1998F, indice de classement Z 69-200, **Paris, La Défense**.
- *La date de Pâques*, 1975, Jacques Levy, extrait de l'Annuaire du Bureau des longitudes pour l'an 1975, **Gauthier-Villars, Paris**.
- *Étude sur la date de Pâques*, 1946, J.-M. Oudin, **Bulletin astronomique XII, Paris**.
- *Le calendrier*, 1946, Paul Couderc, Que sais-je ?, **PUF, Paris**.
- *Manuel de Diplomatie*, 1894, Arthur Giry, **Paris**.
- *Hémérologie*, 1868, Ulysse Bouchet, **Paris**.

- Sur Internet :
- On trouvera une traduction française de la Bulle *Inter Gravissimas* sur le site suivant : *Les textes constitutifs du calendrier grégorien* de Rodolphe Audette, Université Laval, Québec, Canada à l'adresse : <http://www.henk-reints.nl/cal/audette/calgreg.html>

-
Il existe de nombreux sites permettant de faire des concordances entre les calendriers :

- Le site de l'IMCCE : <http://www.imcce.fr>
- Le site des auteurs de *Calendrical Calculations* : <http://emr.cs.uiuc.edu/home/reingold/calendar-book/index.shtml>
- Vous trouverez un instrument de chronologie événementielle et technique à l'usage des spécialistes des époques patristique et médiévale (Millesimo) sur le site suivant : <http://millesimo.irht.cnrs.fr/>

Les chronologies en Sciences de la Terre

Vincent DEPARIS

Maison des Sciences de l'Homme – Alpes, 1221 av. centrale, 38400 St Martin d'Hères

Mail : Vincent.Deparis@msh-alpes.prd.fr

Si l'astronomie nous a ouvert à l'immensité de l'espace, la géologie nous a ouvert à l'immensité du temps. Ne parle-t-on pas de distances astronomiques et de temps géologiques ? Avec Copernic et Newton, les hommes ont perdu leur position privilégiée au centre du Monde ; avec la géologie, ils durent abandonner leur croyance de leur présence sur Terre depuis l'origine des temps. Quoi de plus rassurant en effet pour accrédiiter la suprématie humaine que le concept classique d'une Terre jeune, faite pour les hommes ? Et quoi de plus déroutant, en revanche, que d'envisager une immensité du temps où l'homme n'apparaît qu'au tout dernier instant ? Les métaphores sur l'immensité de l'histoire de la Terre sont nombreuses. On peut relever celle donnée par Stephen Jay Gould : imaginons que la distance séparant le nez de la main lorsque nous étendons le bras représente l'histoire de la Terre. Un simple coup de lime sur l'angle du médius suffit pour effacer toute l'histoire de l'humanité !

Comment les hommes ont-ils découvert cette immensité du temps géologique, comment ont-ils levé le voile qui recouvre l'histoire de notre planète ? Je vais vous faire part ici, sans pouvoir être exhaustif, de quelques étapes remarquables dans cette découverte du temps profond de l'Antiquité jusqu'au début du XIX^e siècle. Deux thèmes peuvent être distingués : la recherche d'une chronologie absolue pour dater l'âge de la Terre et la recherche d'une chronologie relative pour déchiffrer la succession des événements survenus à la surface du globe et ainsi retracer l'histoire de la planète. J'aborderai ces deux thèmes simultanément. Je veux tout d'abord préciser les différentes manières de percevoir le déroulement du temps. En schématisant, l'histoire du globe peut être conçue à partir de deux couples d'opposés : le couple continu/discontinu et le couple réversible (cyclique)/irréversible (orienté). Les différents termes peuvent être regroupés entre eux pour former quatre systèmes indépendants, dont à coup sûr on trouverait des exemples dans l'histoire de la géologie. L'opposition continu/discontinu a souvent été mise en avant, surtout pour différencier les écoles de pensée du XIX^e siècle : il s'agit de la confrontation entre les catastrophistes et les uniformitaristes. Les catastrophistes pensaient que l'histoire de la Terre était une succession de périodes calmes entrecoupées de périodes catastrophiques et paroxysmiques. Les uniformitaristes affirmaient de leur côté que les agents qui avaient façonné la Terre au cours de son histoire n'étaient pas différents en nature et en intensité de ceux que nous voyons agir aujourd'hui. C'était pourquoi le présent était la clé du passé. L'opposition catastrophistes/uniformitaristes révèle une différence d'approche essentielle dans l'étude du Globe, mais une autre opposition est peut-être encore plus significative, comme l'a noté Stephen Jay Gould : c'est la dichotomie entre les modèles cycliques et les modèles orientés. Pour les modèles cycliques, la Terre subissait bien de continues transformations mais sans direction particulière. Les actions à la surface de la Terre se compensaient mutuellement, et la Terre restait, en gros, dans un état de perpétuel équilibre. Pour les modèles orientés, la Terre avait une évolution et son histoire était dirigée par un principe, qui peut être par exemple le refroidissement thermique à partir d'une origine en fusion. La Terre a eu une origine et son état primitif, différent de l'état actuel, a laissé des traces observables. Ces différentes conceptions de l'histoire du globe ont joué un rôle prépondérant dans la découverte du temps profond.

Le temps des Anciens

Les conceptions sur le temps géologique proviennent de la reconnaissance des transformations de la Terre au cours des temps. Dès l'Antiquité, les hommes ont été marqués par les changements violents et subits qui affectaient la surface du globe : l'écroulement d'une montagne, un tremblement de terre, la surrection d'une nouvelle île volcanique. Les changements lents, les modifications régulières ne sont pas non plus passés inaperçus : l'abrasion des montagnes sous l'action des torrents et des eaux, le transport d'alluvions par les fleuves, la formation de deltas, le comblement des mers. L'observation de coquilles marines au milieu de terres émergées laissait également envisager des variations du niveau marin. Les Anciens ont donc compris clairement que la Terre changeait de visage au cours des temps. Mais l'interprétation qu'ils en donnaient différait nettement suivant les écoles de pensée. Pour Aristote et ses partisans, la Terre était éternelle, bien que sujette aux phénomènes de génération et de corruption. Elle subissait des changements constants mais qui en moyenne se contrebalançaient. Ainsi, bien qu'engagée dans un flux continu, la Terre pouvait garder son identité éternelle. Les Stoïciens, au contraire, récusait l'éternité du Monde. La Terre, selon eux, était vouée à la destruction, et elle ne conservait encore actuellement des reliefs malgré l'action de l'érosion que parce que sa formation était récente. Après la destruction générale, qui réduira tous les éléments au feu primitif, la Terre régénérera. Les Stoïciens prônaient un éternel retour des choses, avec une succession de créations et de destructions : à chaque nouveau cycle, le même monde était créé, avec les mêmes êtres et les mêmes événements. Equilibre perpétuel chez Aristote, restauration et répétition cycliques chez les Stoïciens ; dans les deux cas, il y avait conservation du Monde.

Les thèses judéo-chrétiennes, développées indépendamment, présentaient une toute autre vision du déroulement du temps. L'histoire de la Terre était calquée sur l'histoire de la révélation de Dieu aux hommes. Le temps était fléché, l'histoire orientée depuis la Création du Monde, le Déluge, les venues successives des prophètes, la naissance, la mort et la résurrection du Christ, jusqu'au Jugement Dernier. L'histoire avait un sens et les événements s'enchaînaient suivant un ordre et un but précis, permettant une chronologie. Flavius Josèphe (37-100) tenta la première compilation des âges et des générations des personnages de l'Ancien Testament. Mais la première chronologie à nous être parvenue est celle de Théophile d'Antioche (115-181) : la Création du monde remontait à 5 526 ans avant la naissance du Christ. Eusèbe (265-340) approfondit ces recherches en comparant l'histoire judéo-chrétienne avec celle des peuples de Chaldée, d'Assyrie, d'Égypte et de Rome ; il trouva des périodes comparables à celle de Théophile.

Jusqu'au Moyen-Âge compris, les thèses d'Aristote prévalurent néanmoins. Au XIV^e siècle, Buridan (1300-1358) pouvait ainsi tranquillement affirmer : « Je suppose aussi que le monde a perpétuellement existé, comme Aristote semblait l'entendre (...) bien que ce soit faux au gré de notre foi. » Nullement contraint par des considérations sur les durées, il pouvait supposer des cycles de plusieurs millions d'années pour la permutation des terres et des mers. L'âge de la Terre n'était pas un sujet de dispute, ni de discorde. La chronologie longue était de mise.

La révolution copernicienne et la chronologie courte

La révolution copernicienne bouleversa entièrement les mentalités et la perception du Monde. La Terre perdit sa place privilégiée au centre du Monde, et devint un astre semblable aux autres. La réfutation des thèses aristotéliennes laissa le champ libre aux thèses chrétiennes qui définirent la nouvelle culture générale ambiante. Les idées de création, de genèse et d'histoire imprégnèrent la conscience commune, permettant aux chronologies bibliques et historiques courtes de supplanter les chronologies longues. Joseph-Juste Scaliger (1540-1609) renouvela complètement les chronologies, en dressant de manière cohérente un très vaste cadre historique. Il compara, confronta, harmonisa les chronologies antiques (hébraïques, assyriennes, babyloniennes, égyptiennes, grecques et romaines) et celles plus récentes des Vandales, des Ostrogoths, et des Wisigoths. Il passa au crible les bases astronomiques de cinquante calendriers différents. A la suite de Scaliger, le monde savant fut pris par une longue fièvre chronologique. Parmi d'autres, James Ussher (1581-1656) affirma que la Création eut lieu au début de la nuit précédant le 23 octobre de l'an 4004 avant Jésus-Christ. Alphonse de Vignoles

(1649-1744) recueillit plus de 200 calculs différents, le plus court compte 3483 ans depuis la Création jusqu'à Jésus-Christ, et le plus long 6984. Mercator (1512-1594) s'arrêtait au-dessous de 4000, et Christophe Colomb (1450-1506) comptait lui 5343 ans. Kepler (1571-1630) data lui aussi la Création. Newton (1642-1727) reprit à son tour la chronologie des anciens royaumes. Il précisa la date des événements historiques en se servant des observations astronomiques faites par les Anciens (position de l'équinoxe de printemps dans le ciel) et de la précession des équinoxes.

Les idées de création, de genèse et d'histoire purent également être intégrées dans les visions sur la Terre et le récit de sa formation devint un nouveau moyen pour sa connaissance. Ces notions nouvelles apparurent dès les œuvres de Kepler et de Galilée, mais c'est surtout Descartes (1596-1650) qui fit basculer la vision de la Terre en racontant sa genèse en 1644. Il soutint que la Terre s'était structurée à partir d'un ancien Soleil par une suite logique d'événements nécessaires. Par ce récit, il inaugurerait une série d'entreprises parallèles, appelées « théories de la Terre » qui prospérèrent à la fin du XVII^e et au début du XVIII^e siècle. Ces théories cherchaient toutes à donner une explication historique de la structure et du relief du globe terrestre. Elles ne proposaient pas à proprement parler une histoire du Globe, mais elles racontaient sa genèse à partir des matériaux et des lois disponibles et essayaient d'expliquer son aspect actuel avec les montagnes et les mers. Leurs motivations sous-jacentes étaient de proposer une explication scientifique au Déluge. Ces théories de la Terre s'intégraient parfaitement dans la chronologie mosaïque courte et rendaient compte de la formation du globe en 6000 ou 7000 ans.

En 1669, Sténon (1638-1686) fut à l'origine d'une autre avancée considérable dans l'interprétation des structures superficielles. Par ses observations sur les fossiles, les strates et le redressement des couches, il posa les fondements de la stratigraphie et de la tectonique. Il mit en évidence comment la superposition des couches et leur dérangement reflétaient une histoire. Il décrivit l'histoire géologique de la Toscane en l'inscrivant dans la brève chronologie biblique. Il imagina que des cycles emboîtés se succédaient : immersion par les eaux, dépôts de sédiments, creusement de cavités internes, effondrement, nouvelle immersion, nouveau creusement, nouvel effondrement. L'histoire était orientée puisque le temps modelait la vallée d'une manière irréversible, mais cette transformation s'effectuait par l'intermédiaire de processus cycliques. Sténon montrait comment le temps sagittal et le temps cyclique pouvaient se rejoindre pour concevoir l'histoire du globe. Une synthèse entre les principes de Sténon et la démarche des théories de la Terre fut effectuée par Woodward en 1695. Il imagina que tous les terrains avaient été dissous lors du Déluge puis s'étaient re-sédimentés en couches concentriques par ordre de gravité. La Terre était donc formée d'un noyau d'eau et d'un empilement de couches sédimentaires formées d'une manière catastrophique au moment du Déluge avec une stratification uniforme sur l'ensemble du globe.

Les premiers chronomètres géologiques

La Terre avait une genèse qu'on pouvait raconter, et la Bible lui donnait un âge. Au début du XVIII^e siècle, les premiers chronomètres pour évaluer la durée des phénomènes géologiques firent leur apparition. En 1687, Halley (1656-1743) mesura le taux d'évaporation de l'eau dans les océans et trouva que pour la Méditerranée l'évaporation était trois fois supérieure à l'apport d'eau par les fleuves, d'où les forts courants atlantiques traversant le détroit de Gibraltar pour compenser le déficit. Il conclut que la salure des lacs dépourvus d'effluents, comme la mer Caspienne, la mer Morte, devait augmenter avec le temps. En 1715, il poursuivit ses réflexions : si l'évaporation « est bien la cause de la salure de ces lacs, il n'est pas improbable que l'océan lui-même devienne salé par la même cause, et nous sommes ainsi dotés d'un argument pour estimer la durée de toutes choses, par une observation de l'augmentation de la salure des eaux ». Halley proposa ainsi de se servir de la salure de l'océan comme premier chronomètre naturel. Il précisa que son intention était « principalement de réfuter la notion ancienne, récemment entretenue par certains, de l'éternité de toutes choses ; quoiqu'on trouvera peut-être de cette façon que le monde est bien plus vieux que beaucoup ne l'ont jusqu'alors imaginé. » Il ne donna cependant pas de chiffres.

En 1721, Gautier (1660-1737) eut l'idée d'estimer le temps d'érosion des reliefs en mesurant la turbidité des fleuves. Il affirma : « J'ai trouvé par mes différens calculs de réduction, que la terre des

continens pouvait être toute entraînée dans les mers environ dans les trente-cinq mille ans, et que les eaux des mers se soulevant alors de leurs abymes, elles iroient inonder pour lors toute la surface de la Terre. » Ellenberger remarque qu'avec ses mesures (très satisfaisantes) de la turbidité du Rhône et avec la loi qu'il évoque, Gautier ne pouvait pas trouver moins de plusieurs millions d'années pour l'abaissement des reliefs au niveau de la mer. Il se demande si Gautier, en conseillant au lecteur de refaire son calcul, ne lui laissait pas la responsabilité d'écrire noir sur blanc ces millions d'années.

La percée de la chronologie longue

La chronologie longue s'imposa à partir des années 1760. Il est difficile de comprendre tous les éléments qui ont joué dans cette reconnaissance des longues durées. La chronologie longue était-elle liée intrinsèquement au rejet de la Bible ? A-t-elle précédé ou suivi le progrès des connaissances sur la Terre ? Le temps était sans doute mûr pour à la fois se libérer des contraintes bibliques et pour reconnaître la lenteur des phénomènes géologiques. Notons d'ailleurs que les chronologies courtes n'ont prévalu que pendant un temps très bref dans l'histoire des idées (moins de deux siècles). Needham (1713-1781) peut illustrer le double mouvement du rejet de la Bible et de la pleine compréhension de la lenteur des processus d'érosion-sédimentation. En 1769, il affirma que « La Chronologie établie par Moïse n'est en aucune façon celle de la Terre, ni celle de notre système, encore moins celle de l'Univers entier, qui peut, par des systèmes innombrables et successifs, percer fort avant dans l'éternité ; elle est, pour parler rigoureusement, la chronologie du seul genre humain, exprimée uniquement par des générations qui se succèdent, et calculée sur leur durée. » Il assura, sur la base de vitesses d'avancement de terres dans la mer, que « la destruction future des deux continents actuels d'Asie et d'Afrique pour en former de nouveaux ailleurs, donne pour le tems requis environ trois millions d'années, comme il est facile de la vérifier par les mesures géographiques. » Citons, parmi une multitude, d'autres auteurs : Gensanne s'interrogea en 1776 sur l'âge des coulées volcaniques du Vivarais. Vu leur dureté et leur résistance à l'érosion par les eaux courantes, il dit que « le calcul en deviendrait effrayant par le nombre de siècles qui en résulteroit ». Palassou (1745-1830) fut frappé lui par l'action érosive des torrents de montagne. En 1781, il affirma : « M. Gensanne a trouvé, par des observations qu'il prétend non équivoques, que la surface des montagnes baisse d'environ dix pouces par siècle ; ainsi, en les supposant seulement de quinze cens toises au-dessus du niveau de la mer, et toujours susceptibles du même degré d'abaissement, il s'écoulera un million d'années avant leur destruction totale. »

Les effets de l'érosion et de la sédimentation étaient manifestes dans le creusement des vallées, l'abrasion des montagnes, la construction des couches sédimentaires. Dès que la lenteur de ces phénomènes fut pleinement reconnue, la longueur des temps géologiques ne pouvait plus être niée. Toutefois, les longues durées ne se sont pas imposées grâce aux seuls chronomètres géologiques mais aussi grâce aux chronomètres physiques. En 1676, Römer (1644-1710) prouva que la lumière se propageait avec une vitesse finie. Euler (1707-1783) en perçut les premières conséquences : « Certaines étoiles auraient pu être visible plusieurs millions d'années après avoir été anéanties ; car la lumière qui en émane emploie plusieurs millions d'années à franchir l'espace qui les sépare de la Terre. » (Ces temps de trajet n'étaient encore que des estimations puisque ce ne fut qu'en 1838 que Bessel mesura la première parallaxe d'étoiles, et donc la première distance stellaire). William Herschel (1738-1822) accentua : « J'ai regardé plus loin dans l'espace qu'aucun être humain ne le fit avant moi. J'ai observé des étoiles dont on peut prouver que la lumière a mis plus de deux millions d'années à atteindre cette Terre. »

Un autre chronomètre, développé par Buffon (1707-1788) en 1778 dans ses *Epoques de la Nature*, résidait dans le lent refroidissement du globe. Buffon chercha à relater l'histoire du globe et expliqua qu'« il s'agit ici de percer la nuit des temps, de reconnoître par l'inspection des choses actuelles l'ancienne existence des choses anéanties, et de remonter par la seule force des faits subsistants à la vérité historiques des faits ensevelis. » C'était la première fois qu'une telle perspective historique était dégagée. En s'appuyant sur la figure d'équilibre de la Terre, sa chaleur propre, et la nature vitrifiée des roches de la surface, Buffon affirma, après Descartes et Leibniz, que le globe avait été au début de son histoire entièrement fondu et qu'il s'était ensuite progressivement refroidi. Ce lent refroidissement orientait l'histoire du globe, lui donnait une cohérence, et permettait de distinguer différentes époques successives depuis sa consolidation jusqu'à sa mort thermique future. Le temps était fléchi, l'histoire orientée par un

principe directeur. L'idée du refroidissement permettait également à Buffon d'estimer l'âge de la planète. En effectuant une série d'expériences sur le refroidissement de globes de métaux, de verre ou de pierre et en extrapolant ses résultats au globe de la Terre, il arriva à la conclusion que si la Terre avait été initialement entièrement en fusion, il aurait fallu 2905 ans pour que la consolidation atteigne le centre, 33 911 ans pour qu'il fût possible de la toucher, et 74 047 ans pour que la température baisse jusqu'à la température actuelle. Cet âge du globe, déjà considérablement allongé par rapport aux chronologies bibliques, lui paraissait encore trop faible lorsqu'il cherchait à expliquer les phénomènes géologiques. Dans ses manuscrits, il envisagea ainsi des âges allant jusqu'à dix millions d'années. Mais il précisa : « Quoiqu'il soit très vrai que plus nous étendrons le temps et plus nous approcherons de la vérité et de la réalité de l'emploi qu'en a fait la Nature, néanmoins il faut le raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence. » Le temps long, s'il heurtait encore la conscience commune, s'était imposé chez les acteurs de la géologie naissante.

La géologie historique

La longue durée des phénomènes géologiques commençait à être acceptée, reconnue, confirmée. D'un autre côté, Buffon avait donné une première histoire globale de la Terre, où différentes époques se succédaient. Mais cette histoire restait succincte, générale, identique pour toutes les régions du globe. A la fin du XVIII^e siècle et au début du XIX^e siècle, la géologie prit son envol et allait découvrir sa dimension historique, c'est-à-dire sa capacité à distinguer la succession régionale, particulière, contingente des événements survenus à la surface du globe. Cette grande éclosion de la géologie provint de la réunion et de la synthèse de différentes branches de recherche jusqu'alors distinctes. Une branche de recherche concernait les fossiles. Cette recherche était surtout encore une science des échantillons, poursuivie à l'intérieur des cabinets, sur des collections. Le but était de décrire, d'identifier et de classer les fossiles comme on pouvait le faire pour des plantes séchées, des squelettes ou des coquillages. L'étude des fossiles s'effectuait ainsi sans aucun lien avec la nature des terrains où ils avaient été découverts. Une autre branche de recherche concernait la structure à trois dimensions de la croûte terrestre. C'était ce qu'on appelait la géognosie, véritable méthode d'investigation du sous-sol. Le but était de reconnaître et de différencier les différents minéraux et roches formant la surface terrestre et d'en déterminer l'organisation spatiale. Il s'agissait en fait d'appliquer les principes de Sténon et de développer une lithostratigraphie en déterminant l'ordre structural des terrains. Werner tenta d'expliquer les conditions de formation des différentes unités lithostratigraphiques mises en évidence. Il avança une théorie explicative unificatrice : la théorie neptunienne. Celle-ci professait que tous les minéraux et toutes les roches, y compris le basalte et le granite, étaient des produits de l'eau, formés à partir d'un océan primordial où toute la matière était initialement dissoute. Les différents terrains s'étaient déposés successivement en se séparant de l'océan. La théorie neptunienne semblait reprendre l'idée de base de Woodward d'une sédimentation successive de tous les terrains, mais en dilatant les temps disponibles. Elle proposait une histoire orientée, semblable pour toutes les régions du globe.

L'étude du bâti et de la structure de la croûte fut prolongée par Hutton en 1795. Ce dernier fit deux observations déterminantes. Il remarqua d'abord que des veines de granite pouvaient recouper des roches sédimentaires. Cette disposition ne pouvait s'expliquer que si le granite était postérieur aux roches sédimentaires et s'il avait été injecté à l'état de fusion. Il s'opposait ainsi à l'école neptunienne et développa l'école plutoniste qui faisait jouer un rôle important à la chaleur souterraine. Il comprenait ensuite la signification des discordances et les interprétait pour ce qu'elles étaient : des démarcations entre deux cycles d'érosion-sédimentation-orogénèse successifs. Ces deux observations confirmaient a posteriori une très forte vision cyclique du temps. Hutton était en effet essentiellement préoccupé par des raisons finalistes : le maintien de la vie sur Terre. Il était ainsi nécessaire que la planète présente une certaine stabilité et qu'elle puisse se préserver dans la durée. Il était donc indispensable qu'un processus soit capable de compenser les phénomènes destructeurs dus à l'érosion. Hutton imagina ce processus restaurateur sous forme de cycles auto-entretenus : les phénomènes d'érosion arasaient inexorablement les continents et entassaient quantité de matières minérales sous forme de couches sédimentaires sur le fond des océans. Au fur et à mesure que ces couches se superposaient les unes sur les autres, elles étaient consolidées sous l'action "du feu, ou chaleur" des régions souterraines. Elles étaient ensuite soulevées par

la force expansive de ce même "feu, ou chaleur", pour former un nouveau continent où un nouveau cycle pouvait survenir. La Terre possédait donc une capacité autorégénératrice, évitant sa déchéance. Paradoxalement, il n'y avait pas d'histoire chez Hutton, car le temps cyclique était poussé jusqu'à sa logique extrême. Les cycles terrestres, toujours semblables, se superposaient l'un à l'autre sans donner une orientation particulière au globe, en le maintenant constamment dans un équilibre dynamique. C'est pourquoi Hutton affirma : « Si tant est que la succession des mondes soit établie dans le système de la nature, il serait vain de chercher quoi que ce soit de plus reculé dans l'origine de la Terre. En sorte que notre enquête nous amène à conclure que nous ne trouvons pas le moindre vestige d'un commencement, pas la moindre perspective d'une fin. »

La stratigraphie paléontologique naquit au début du XIX^e siècle par la réunion de ces différentes branches de recherche, et permit à la géologie de se donner une nouvelle tâche : reconstituer l'enchaînement des événements survenus à la surface du globe. La géologie devint réellement une science historique. L'idée de base de la stratigraphie paléontologique fut de s'intéresser non plus seulement aux fossiles ou aux strates mais aux rapports entre les fossiles et les couches qui les contenaient. Trois étapes se distinguent dans la fondation de la stratigraphie paléontologique. Premièrement, la découverte que des couches différentes renfermaient des fossiles différents. Cette étape avait été franchie dès le XVII^e siècle. Deuxièmement, la compréhension que les différences de faunes et de flores fossiles pouvaient être mises en relation avec des différences d'âges, donc qu'elles marquaient des moments distinctifs sur l'échelle des temps. Cette étape s'était élaborée vers la fin du XVIII^e ; elle ne fut possible qu'en concevant une gradation dans la vie et en considérant que les faunes fossiles différaient d'autant plus des faunes actuelles que l'on reculait dans le passé de la Terre. Et troisièmement, l'utilisation des fossiles comme moyen préférentiel de datation relative des couches. Cette étape est due à Smith, Brongniart, et Cuvier au début du XIX^e. Grâce à sa plus haute fiabilité, la stratigraphie paléontologique remplaça progressivement la lithostratigraphie et les faunes fossiles se substituèrent aux couches elles-mêmes comme chronomètres relatifs. La reconstitution de l'histoire de la Terre put alors être entreprise. En donnant le moyen de dater les événements de la surface de la Terre, la stratigraphie paléontologique permettait aux autres marqueurs (fossiles de faciès, discordances) de servir uniquement à caractériser la nature des événements. Les deux fonctions des archives (dater et renseigner sur la nature des événements) se trouvèrent dissociées et c'est ce que Gabriel Gohau nomme le « double archivage ». L'histoire de la Terre se morcela, se régionalisa et put être reconstruite comme une suite d'événements contingents.

En ce début du XIX^e siècle, il existait donc des chronomètres absolus pour dater l'âge du globe : des chronomètres géologiques (salure des océans, taux d'érosion, taux de sédimentation) et des chronomètres physiques (refroidissement du globe). Il existait également un chronomètre relatif parfaitement fiable, l'étagement différentiel des fossiles à travers le temps, qui permettait la datation relative des terrains et la reconstitution des histoires régionales du globe. Les controverses étaient cependant encore loin d'être terminées, d'une part sur l'âge du globe entre les géologues et les physiciens (estimation de Lord Kelvin, puis la découverte de la radioactivité), et d'autre part sur le déroulement de l'histoire du globe, entre les catastrophistes et les uniformitaristes.

Bibliographie

L'article est une synthèse personnelle des idées trouvées dans les ouvrages ou articles suivants :

- Deparis V. et Legros H., *Voyage à l'intérieur de la Terre*, Paris, CNRS Editions, 2000.
Ellenberger F., *Histoire de la géologie*, Paris, Tec et Doc, tome II, 1994.
Gohau G., *Les Sciences de la Terre aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, Albin Michel, 1990.
Gohau G., « Histoire de la chronologie en géologie », in *Le Temps en géologie*, Paris, Hachette, collection Synapses, 1995.
Gould S. J., *Aux Racines du Temps*, Paris, Grasset, 1990.
Richet P., *L'âge du monde*, Paris, Seuil, 1999.
Rudwick M., « Smith, Cuvier et Brongniart, et la reconstitution de la géohistoire », *De la Géologie à son histoire*, CTHS, 1997, p.119-128.

Les horloges atomiques à refroidissement d'atomes

Philippe LAURENT

BNM-LPTF, Observatoire de Paris
61, Avenue de L'Observatoire 75014 PARIS
philippe.laurent@obspm.fr

Introduction

La réalisation, l'amélioration et la distribution d'une unité de temps identique pour toute la communauté scientifique est la préoccupation majeure des laboratoires de métrologie temps /fréquence. L'importance de cette discipline se perçoit par le grand nombre de laboratoires métrologiques disséminés dans la plupart des pays industrialisée et par l'existence d'un organisme international, le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), chargé de faire la synthèse de tous les résultats pour fournir l'échelle de temps de référence: le Temps Atomique International (TAI).

L'accessibilité au plus grand nombre à une unité de temps unique a favorisé pendant des siècles l'utilisation de la rotation terrestre comme gardien d'une échelle de temps universelle.

La régularité du mouvement terrestre semblait être acquise. Or, au cours du 20^{ème} siècle, les développements scientifiques et techniques sur les oscillateurs, oscillateurs à quartz par exemple, et dans le domaine de la physique atomique, ont révélé que la période de rotation diurne du mouvement terrestre présentait des irrégularités de l'ordre de quelques millisecondes par jour.

Les résultats obtenus en 1955 sur la première horloge atomique à césium [1] et les développements qui s'en suivirent, ont conduit, en 1967, à un changement de la définition de l'unité de temps. Le temps de référence devient un temps atomique et sa définition est : *Une seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondante à la transition entre les 2 états hyperfins de l'atome de césium 133.* La notion de durée est donc reliée à la mesure de la fréquence d'une résonance atomique. Par ailleurs, pour souligner l'importance des horloges atomiques dans d'autres domaines métrologiques, les unités fondamentales comme le mètre, l'ohm ou le volt reposent sur une mesure de fréquence.

Il est donc admis que les propriétés atomiques sont universelles. Le but des horloges atomiques est de rendre accessible les propriétés atomiques avec le minimum de dégradation. C'est le travail permanent des laboratoires temps /fréquence comme le BNM-LPTF.

Principe d'une horloge atomique

Dans une horloge atomique, les atomes interagissent avec l'onde électromagnétique générée par un oscillateur extérieur. Ce dernier peut être un oscillateur à quartz ou un oscillateur cryogénique pour délivrer des fréquences dans le domaine radiofréquence ou un laser pour le domaine optique. Ces objets macroscopiques délivrent un signal périodique dont la fréquence se dénature au cours du temps. Ces dérives de fréquence sont provoquées par des modifications irréversibles de leur structure complexe interne dues au vieillissement ou à l'action de l'environnement.

Les atomes ont leurs énergies internes quantifiées. L'écart entre les niveaux d'énergie est donné par la relation $E=h\nu$ où h est la constante de Planck et ν une fréquence. Cette fréquence ne dépend que de

la composition interne de l'atome. Elle est donc identique pour tous les atomes d'une même espèce et elle stable dans la mesure où les constituants élémentaires de l'atome le sont. Sous-réserve de respecter quelques propriétés de symétrie, une onde de fréquence ν peut donc changer l'état interne de l'atome par absorption d'un quantum de lumière, le photon, ou par émission stimulée d'un quantum de même fréquence. L'objectif d'une horloge atomique est donc de comparer la fréquence de l'oscillateur extérieur avec la fréquence de résonance atomique, en mesurant l'état interne de l'atome, de façon à corriger les fluctuations de fréquence de l'oscillateur.

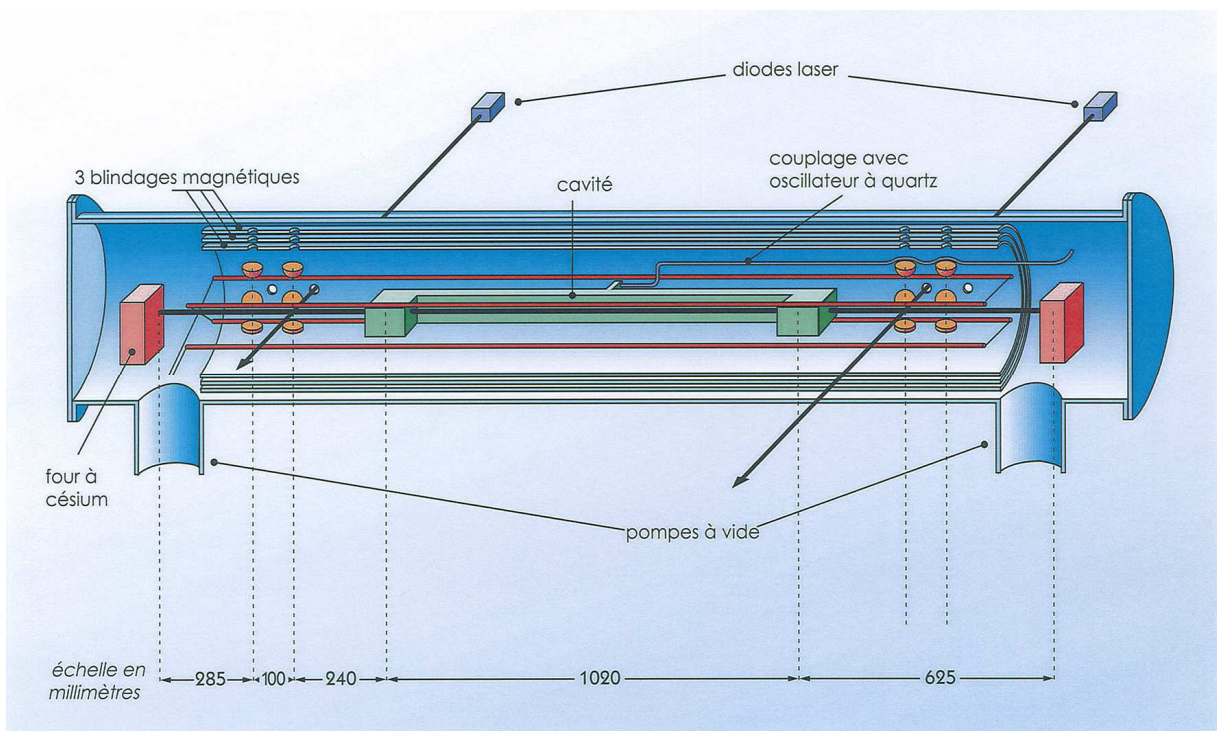
Lorsque l'atome est soumis au rayonnement de l'oscillateur, le taux de transition entre ses deux états d'énergie est une grandeur probabiliste donnée par les lois de la mécanique quantique. Ce taux atteint un maximum (probabilité égale à 1) lorsque la fréquence de l'oscillateur coïncide avec la résonance atomique. La mesure de l'état interne de l'atome, qui s'effectue aisément par différentes méthodes, permet alors d'asservir la fréquence de l'oscillateur sur le maximum du taux de transition. Lorsque la fréquence de l'oscillateur est verrouillée sur la résonance atomique, l'oscillateur délivre le signal de référence. Dans le domaine radiofréquence, grâce aux outils électroniques, la fréquence du signal peut se multiplier, se traduire ou se diviser suivant l'application à satisfaire, par exemple un top par seconde. Dans le domaine optique, avec les composants non-linéaires, il est aussi possible de réaliser des opérations algébriques simples sur les fréquences. La plus grande difficulté survient lorsqu'il faut relier les fréquences optiques ($4 \cdot 10^{14}$ Hz) aux radiofréquences 10^{10} Hz. Cette difficulté est en passe d'être surmontée par le développement des lasers impulsions femto-seconde.

Si l'écart de fréquence entre les deux niveaux d'énergie est stable et universel, le seul fait de la mesurer entraîne des perturbations. En premier lieu, la durée finie de l'interaction induit un élargissement en fréquence de la résonance atomique.

En outre, les atomes sont soumis à des perturbations électromagnétiques qui proviennent de l'environnement, interactions atome-atome ou atome-rayonnement. L'écart, $\Delta\nu$, de la fréquence mesurée par rapport à celle de la résonance atomique peut se mettre alors sous la forme de la somme de 2 termes :

$$\Delta\nu = \eta(\tau) + \epsilon$$

où $\eta(\tau)$ représente des fluctuations aléatoires et ϵ un déplacement de la fréquence mesurée.



Coupe d'un étalon de fréquence à césium (partie atomique)

Il est donc nécessaire de moyenniser, dans le temps, le signal pour réduire la composante aléatoire. La stabilité de fréquence de l'horloge caractérise la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne. C'est un écart type (écart type d'Allan) qui décroît avec la durée des mesures jusqu'à un certain niveau. Cet écart type s'améliore avec l'augmentation du temps d'interaction des atomes et du rapport signal à bruit de détection. Il faut aussi évaluer les effets de l'environnement pour déduire la valeur de ϵ avec la plus petite incertitude. L'exactitude de fréquence de l'horloge caractérise l'ensemble de ces incertitudes et, en général, elle s'améliore aussi comme la stabilité de fréquence.

La fontaine atomique et le refroidissement laser

Depuis 1955, les performances des horloges à césium subissent une amélioration constante. L'exactitude de fréquence a gagné un facteur 10^5 pour atteindre une valeur relative de $1 \cdot 10^{-15}$. Jusqu'aux années 1990, toutes les horloges à césium reposaient sur le même principe : un jet thermique d'atomes interagit avec le champ électromagnétique de l'oscillateur dans une cavité micro-onde de Ramsey [2]. Le principe de la méthode de Ramsey repose sur une interrogation en 3 phases : une première interaction avec le champ électromagnétique, suivie d'une phase sans champ de durée plus longue, T , pour terminer avec une seconde interaction. Avec cette combinaison, on crée un système interférométrique, et la largeur du signal de résonance est approximativement égale à $1/T$. L'avantage de cette méthode est de réduire la durée t de l'interaction avec le champ électromagnétique. Ainsi les perturbations indésirables, toujours présentes, liées au champ électromagnétique sont réduites dans le rapport T/t .

La vitesse élevée des atomes du jet, quelques centaines de mètres par seconde, limite le temps total d'interrogation à environ 10 ms (il en résulte une largeur de résonance de l'ordre de 100 Hz). Les meilleures horloges à jet thermique ont une stabilité relative de fréquence de l'ordre de $5 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$ où t est le temps de mesure et une exactitude relative de $7 \cdot 10^{-15}$.

Pour augmenter le temps d'interaction, une idée originale, proposée par Zacharias, consistait à faire fonctionner l'horloge à la verticale pour profiter de l'effet de la gravité, comme dans une fontaine, et en utilisant une seule zone d'interaction. Les atomes interagissent une première fois à l'aller, retombent sous l'effet de la gravité et interagissent une seconde fois [3]. La longue durée entre les deux interactions devait conduire à des résonances beaucoup plus fines. En 1953, Zacharias a construit une horloge de 5 mètres de haut avec un jet thermique placé à la base et il n'a rien détecté... La distribution de vitesse des atomes ne descendait pas à des vitesses suffisamment lentes pour qu'une partie des atomes retombe sous l'effet de la gravité.

Ce n'est que bien plus tard, à la fin des années 80, que son idée a été reprise grâce aux résultats obtenus sur le refroidissement laser [4,5,6]. En 1989, une fontaine, utilisant des atomes de sodium refroidis en mélasse optique, a permis d'obtenir un signal de résonance de largeur égale à 2 Hz [7]. En 1991, une fontaine, utilisant cette fois des atomes de césium, a fourni un signal de résonance de 2 Hz [8]. Et en 1994, le BNM-LPTF faisait fonctionner la première horloge à césium en fontaine atomique.

Principe de la fontaine atomique

La figure 1 (ci-dessous à droite) représente le schéma du tube horloge de la fontaine atomique du BNM-LPTF. La zone de préparation des atomes froids contient six faisceaux lasers le long des 3 directions de l'espace. La pression de vapeur de césium dans cette zone est de l'ordre de 10^{-6} Pa. Environ 10^8 atomes viennent se refroidir et s'accumuler à l'intersection de 6 faisceaux lasers sur une durée de fonctionnement des lasers de 500 ms. La fréquence des faisceaux laser est proche de la transition optique $6S_{1/2} F=4$, $6P_{3/2} F=5$ à 852 nm.

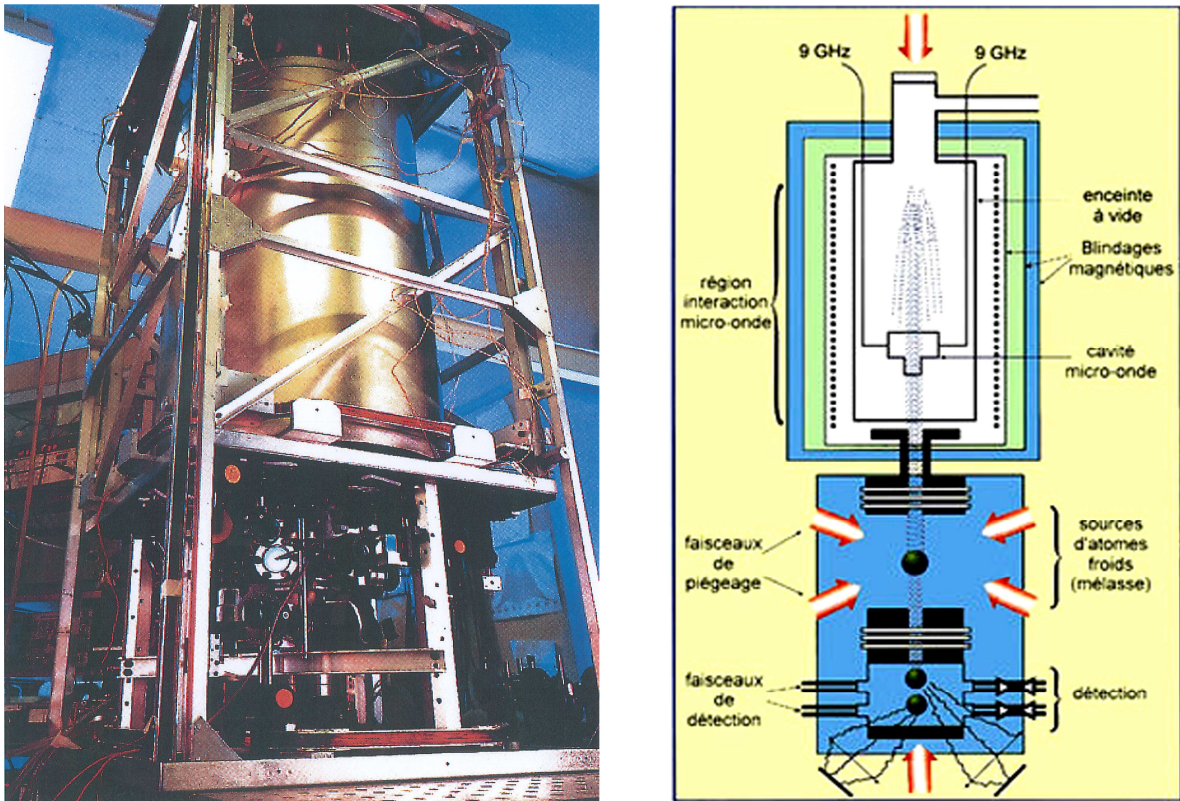


Figure 1: Fontaine atomique du BNM-LPTF à l'Observatoire de Paris; schéma du tube horloge (à droite) et photo de la fontaine F01 (à gauche). Copyright BNM-LPTF, Observatoire de Paris

Puis, en changeant légèrement la fréquence des faisceaux lasers (quelques MHz), le nuage d'atomes froids est lancé à une vitesse de 4m/s et refroidis à 1 μ K. La vitesse d'agitation thermique correspondant à cette température est de 1 cm/s. A la température ambiante, 300 K, la vitesse d'agitation thermique des atomes est de l'ordre de 200 m/s. Par conséquent, grâce au refroidissement laser, il devient facile d'augmenter considérablement le temps d'interaction. La transition d'horloge à 9.192... GHz s'effectue entre les 2 états hyperfins dénommés en spectroscopie $F=3, m_F=0$ et $F=4, m_F=0$. Or, après le lancement, les atomes sont répartis dans les 9 états $F=4, m_F=-4, -3, \dots, 3, 4$. Une zone de préparation placée au-dessus de la zone de refroidissement permet de sélectionner les atomes dans le seul état $F=3, m_F=0$. Une excitation micro-onde, à 9,192... GHz, dépeuple l'état $F=4, m_F=0$ au profit du seul niveau $F=3, m_F=0$. Les atomes demeurant dans les états $F=4$ sont alors expulsés par la pression de radiation d'un faisceau laser. Donc, seuls les atomes $F=3, m_F=0$ poursuivent leur vol balistique, traversent une cavité cylindrique μ -onde de longueur 4 cm dans laquelle ils subissent l'interaction électromagnétique à l'aller puis au retour. Le signal micro-onde injecté dans cette cavité provient de l'oscillateur externe à asservir. Le temps de vol entre les 2 interactions peut atteindre 0.7 s. Après les 2 interactions, les atomes sont dans une superposition des 2 états $F=3, m_F=0$ et $F=4, m_F=0$ avec une probabilité respective égale à $1-P$ et P . La valeur de P dépend de la fréquence micro-onde pour une puissance injectée dans la cavité constante. Cette puissance a une valeur optimale. La zone de détection est placée tout en bas du tube. Un premier faisceau laser excite la transition optique $6S_{1/2} F=4, 6P_{3/2} F=5$. Dans le faisceau laser, les atomes sont projetés dans l'état $F=4$ avec la probabilité P et dans l'état $F=3$ avec la probabilité $1-P$. Seuls les atomes en $F=4$ émettent des photons de fluorescence qui sont récoltés par une photodiode. Puis un second faisceau laser expulse, par pression de radiation, les atomes en $F=4$. Un troisième faisceau agit alors sur les atomes qui subsistent : les atomes dans l'état $F=3$. Une deuxième photodiode récolte les photons de fluorescence. Les signaux des photodiodes sont numérisés et intégrés pour déterminer le nombre d'atomes dans chacun des 2 états et pour en déduire la probabilité P :

$$P = \frac{\text{Nbreatomes } F=4}{\text{Nbreatomes } F=3 + \text{Nbreatomes } F=4}$$

A partir de la valeur de P , une correction de fréquence est appliquée à l'oscillateur et un nouveau cycle de fonctionnement recommence.

Sur la figure 2, nous montrons le signal de résonance que nous obtenons lorsque nous balayons la fréquence de l'oscillateur et enregistrons la probabilité P correspondante. Ce spectre est typique d'une interrogation de type Ramsey. Nous obtenons un réseau de franges centré sur la fréquence de résonance atomique. La largeur de la frange centrale est de 1 Hz déterminée par le temps de vol des atomes. La largeur de l'enveloppe est conditionnée par le temps de passage des atomes dans la cavité micro-onde. A titre de comparaison, la largeur d'une frange de résonance d'une horloge à jet thermique est égale à la largeur de l'enveloppe que nous obtenons avec la fontaine atomique.

Pour asservir l'oscillateur, sa fréquence est modulée en carré à la période du cycle, autour de la fréquence centrale et sur une amplitude de 0.5 Hz (demi-largeur de la frange centrale et correspond à $P=1/2$). La mesure de la probabilité de transition de part et d'autre de la résonance permet de calculer une correction de fréquence qui est envoyée à l'oscillateur à chaque cycle. Cet asservissement fonctionne comme une détection synchrone.

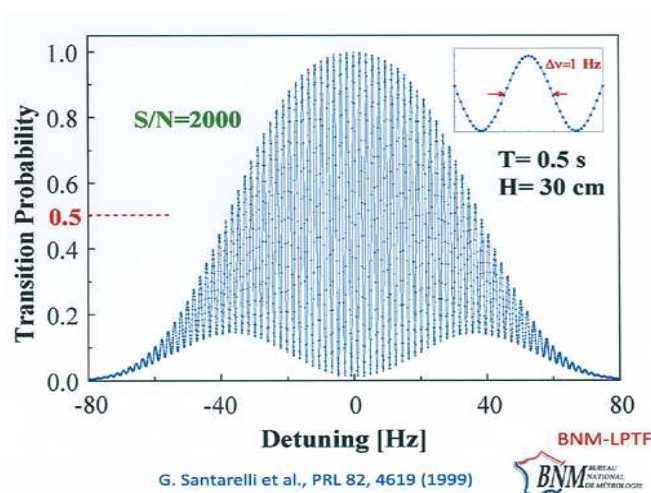
Pour limiter les perturbations que peuvent subir les atomes, un grand nombre de précautions doivent être prises dans la réalisation de l'horloge. Il est indispensable de maintenir dans l'enceinte un excellent vide, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-8}$ Pa, pour éviter de perdre des atomes froids par collision avec le gaz résiduel.

La valeur de la transition d'horloge dépend du champ magnétique vu par les atomes. Des blindages magnétiques et des solénoïdes sont placés tout autour de l'enceinte pour limiter les effets de l'environnement et pour produire un champ magnétique très homogène le long de la trajectoire atomique. Ce champ magnétique est nécessaire pour conserver les atomes dans les 2 états $m_f=0$ avec un écart énergétique constant. La température de l'enceinte doit être homogène et connue de façon à déterminer l'effet du rayonnement thermique sur la transition atomique. La cavité d'interaction doit rejeter au mieux l'effet Doppler : La phase du champ dans la cavité ne doit pas présenter de variations le long des trajectoires atomiques. Et la cavité doit laisser passer le plus grand nombre d'atomes froids. Aucun champ électromagnétique à 9,192... GHz ne doit être présent en dehors de la cavité. Le spectre de l'oscillateur ne doit pas contenir de raies parasites. Enfin, la lumière laser doit être parfaitement éteinte lorsque les atomes sont dans la zone d'interrogation.

La stabilité de fréquence obtenue avec la fontaine atomique atteint $1 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$ lorsque l'oscillateur est un quartz [9]. Mais lorsque le quartz est remplacé par un oscillateur cryogénique (celui-ci nous a été prêté par l'Université Ovest d'Australie [10]), la stabilité de fréquence atteint $4 \cdot 10^{-14} t^{-1/2}$ [11]. Dans le premier cas, le bruit de l'oscillateur à quartz limite la stabilité de l'horloge. Dans le deuxième cas, le bruit de l'oscillateur devient négligeable et nous atteignons le bruit intrinsèque de la fontaine atomique : le bruit de projection quantique [12] du à la distribution statistique des atomes dans les 2 niveaux hyperfins. Le niveau de ce bruit décroît comme l'inverse de la racine du nombre d'atomes détectés (en général nous détectons 10^5 à 10^6 atomes). Ces niveaux de stabilité représentent les meilleurs résultats jamais atteints par une horloge à césium.

Le tableau 1 résume le budget d'exactitude de la fontaine. L'ensemble de ces effets systématiques est mesuré. Il est évident que l'incertitude sur les mesures est donnée par la stabilité de fréquence de la fontaine. Les mesures de stabilité ne peuvent se faire que par comparaison avec un autre oscillateur. Les résultats du tableau 1 sont obtenus lorsque l'oscillateur de comparaison est un maser à hydrogène.

Figure 2: Signal de résonance (réseau de franges de Ramsey) obtenu par balayage de la fréquence de l'oscillateur dans une fontaine atomique



La stabilité de fréquence du maser est un peu meilleure que la fontaine sur des temps de mesure inférieurs à 1 000s. Sur des temps plus longs, la stabilité du maser atteint un plancher à 10^{-15} . Cela signifie que la résolution sur la valeur de nos mesures ne peut pas descendre au-dessous de cette valeur plancher.

Effect	Correction [10^{-15}]	Uncertainty [10^{-15}]
First Order Doppler	0	≤ 0.5
Second order Doppler and gravitation	0	$\ll 0.01$
Cold collisions	1	≤ 0.5
Background gas collisions	0	≤ 0.5
Blackbody radiation	+17.6	≤ 0.5
Zeeman shift	-133	≤ 0.1
Pulling by other lines	0	0.4
Microwave leaks	0	0.2
Microwave spectrum	0	0.2
Total 1σ uncertainty		1.1

Tableau 1: Budget d'exactitude de la fontaine atomique F01 du BNM-LPTF à l'Observatoire de Paris

Cependant, il est toujours possible, pour certains effets systématiques, d'exagérer leurs contributions afin de réduire leurs incertitudes lorsque la fontaine fonctionne dans les conditions optimales. L'incertitude relative sur la valeur de la fréquence mesurée est aujourd'hui de $1,1 \cdot 10^{-15}$. La fontaine atomique du BNM-LPTF est donc la meilleure horloge jamais construite.

Dans un futur proche, un niveau d'exactitude au niveau de quelques 10^{-16} semble accessible. Au-delà de cette valeur, nous percevons quelques difficultés. En premier lieu, la durée de l'interrogation est limitée par la gravité terrestre. La pesanteur empêche aussi d'avoir des vitesses moyennes atomiques faibles pour réduire l'effet Doppler résiduel. En outre, l'atome de césium a l'inconvénient d'interagir fortement avec ses congénères à cause de son potentiel électromagnétique à longue distance. Le déplacement de fréquence qui en résulte, de l'ordre de $8 \cdot 10^{-15}$ pour 10^6 atomes détectés, empêche d'augmenter considérablement le nombre d'atomes froids pour gagner en stabilité de fréquence et donc en résolution de mesure. Il est, en effet, difficile de contrôler la densité atomique et par suite le déplacement collisionnel pour obtenir une incertitude en deçà de 10^{-16} . Nous verrons que l'atome de rubidium ne possède pas cette particularité.

Une horloge spatiale à atomes froids

L'avantage de s'affranchir de la gravité terrestre offre la possibilité de travailler avec des atomes encore plus lents avec des vitesses constantes. Par ailleurs, la possibilité de varier la vitesse de lancement sur plusieurs ordres de grandeurs permet d'explorer plus finement les effets systématiques. Les performances d'une horloge spatiale à atomes froids devraient donc surpasser leurs homologues terrestres.

En 1994, le programme PHARAO, acronyme de Projet d'Horloge Atomique à Refroidissement d'Atomes en orbite, a vu le jour sous l'égide du CNES, du BNM-LPTF et de l'ENS-LKB. La première partie de ce programme s'est concrétisée par la construction d'un prototype d'horloge compact et par des validations en vols paraboliques en 1997 [13].

En 1998, la proposition Européenne pour la mission spatiale ACES : Atomic Clock Ensemble in Space, a été acceptée par l'agence spatiale Européenne. La charge utile contient une horloge à atomes froids de césium développée par la France, un maser à hydrogène développé en Suisse et des moyens de liaisons avec les stations sols pour transférer les signaux des horloges. Cet ensemble sera installé sur une

express pallet de dimension 1 m³ environ placée sur la poutre centrale de la station internationale. Le lancement est prévu en 2005 pour une durée de la mission de 18 mois.

Les objectifs de la mission incluent la validation de l'horloge à atomes froids. Nous prévoyons une stabilité de fréquence comprise entre 7 et 10 10⁻¹⁴ t^{-1/2} et une exactitude de fréquence autour de 1 10⁻¹⁶. Avec les équipements de transfert de temps/fréquence, nous pourrions comparer l'échelle de temps du bord avec les horloges sols avec une exactitude de 30 picosecondes (10⁻¹⁶ en fréquence). De l'ensemble de ces comparaisons, nous attendons des résultats en physique fondamentale : en relativité restreinte et générale, et des tests sur la stabilité de certaines constantes de la physique : la vitesse de la lumière et la constante de structure fine responsable de l'interaction électromagnétique. Cette mission doit être aussi un précurseur pour d'autres missions spatiales. L'étude et l'utilisation des atomes froids dans l'espace ouvrent de nouvelles perspectives du fait de l'augmentation du temps d'observation des atomes froids.

Une horloge transportable

Nous avons transformé le prototype d'horloge spatiale en une fontaine atomique pour optimiser ses performances au sol. Son encombrement réduit demeure et cela permet de la transporter dans d'autres laboratoires. Aujourd'hui pour comparer des horloges distantes, nous utilisons des liaisons par satellites. Ces comparaisons sont absolument nécessaires pour vérifier la reproductibilité des horloges atomiques. Or les moyens actuels sont insuffisants en terme de stabilité et d'exactitude de fréquence pour comparer les performances des fontaines atomiques. En attendant que la mission ACES soit opérationnelle, l'horloge transportable peut remplir cette fonction.

Une comparaison de fréquence avec la fontaine atomique a montré que les 2 horloges étaient en accord à 2 10⁻¹⁵. En 1999, cette horloge a été transportée à l'institut Max Planck à Garching en Allemagne. L'objectif était de mesurer la fréquence absolue d'une raie de résonance (1S-2S) de l'atome d'hydrogène. L'exactitude de fréquence mesurée a atteint 2 10⁻¹⁴ [14]. Ce résultat représente la meilleure valeur jamais atteinte sur une mesure de fréquence dans le domaine optique.

Actuellement le seul moyen de comparaison entre horloges distantes utilise des satellites. Les satellites du GPS embarquent des horloges.

Une horloge à rubidium

Nous avons évoqué précédemment le rôle important des collisions entre atomes de césium sur le bilan d'exactitude. De nombreuses expériences et des résultats théoriques, menés sur l'atome de rubidium, ont montré que cet atome ne possédait pas la particularité du césium et que le déplacement collisionnel était d'au moins un ordre de grandeur plus petit que pour l'atome de césium. En conséquence de quoi, le bilan d'exactitude d'une fontaine à rubidium devrait être un peu meilleur que pour une fontaine à césium.

De surcroît, il est communément admis que les propriétés atomiques sont stables dans le temps. Il est donc fondamental de vérifier cette assertion ou, peut-être, d'en montrer une violation. Par exemple, nous pouvons rechercher l'existence d'une dérive de la structure fine en comparant les transitions hyperfines de 2 atomes différents [15].

En 1998, nous avons donc construit, au BNM-LPTF, une fontaine à rubidium 87. La géométrie de cette expérience est similaire à nos deux autres fontaines, mais la fréquence d'horloge est à 6,8... GHz. La stabilité de fréquence est de 1,5 10⁻¹³ t^{-1/2} et l'exactitude est de 2 10⁻¹⁵. Une comparaison avec la fontaine atomique a permis de réactualiser la valeur de la transition hyperfine de l'atome de rubidium 87 : 6 834 682 610,904 333 (17) Hz. Nous avons aussi montré que le déplacement collisionnel est au moins 30 fois plus petit que le césium. Sur une période d'un an, nous n'avons pas décelé de variation sur l'écart en fréquence entre la fontaine rubidium et la fontaine césium. Nous pouvons donc mettre une valeur limite supérieure à une possible variation de la constante de structure fine ; celle-ci est estimée à 3 10⁻¹⁴ par an.

Afin d'améliorer cette estimation, la fontaine rubidium est en cours de modification pour fonctionner soit avec des atomes de rubidium, soit avec des atomes de césium. Cette double configuration va permettre de corrélérer une partie des effets systématiques sur les valeurs des deux fréquences d'horloge et, ainsi, augmenter la résolution sur la comparaison des fréquences sur de longues périodes.

Perspectives

Avec les techniques de refroidissement laser, les horloges à césium ou à rubidium devrait atteindre prochainement une exactitude et une stabilité de fréquence sur un jour de l'ordre de $1 \cdot 10^{-16}$. Il existe, pour l'instant, un léger avantage pour les atomes de rubidium à cause du faible déplacement de fréquence du aux collisions entre atomes. Cependant, des résultats théoriques montrent que le déplacement collisionnel pourrait s'annuler avec des atomes de césium si leurs températures descendent au niveau de 100 nK. Des expériences seront conduites dans ce sens.

Une autre voie de recherche concerne l'application aux horloges à atomes froids des méthodes de *squeezing* [16] pour créer une sorte de corrélation entre atomes et supprimer le bruit de projection quantique. Dans ces conditions, le bruit limite décroît comme l'inverse du nombre d'atomes détectés ; soit un gain potentiel en stabilité d'un facteur 1000 lorsque 10^6 atomes sont détectés.

Les performances d'une horloge atomique sont liées à la valeur de la fréquence de résonance atomique. En effet, pour définir une durée, il suffit de compter le nombre d'oscillations du signal d'horloge. Comme la plupart des sources de bruit et des déplacements de fréquence dans une horloge atomique sont indépendants de la fréquence, il suffit de trouver des transitions atomiques à plus hautes fréquences : dans le domaine optique, par exemple, où les fréquences sont 10 000 à 1 000 000 plus élevées (~500 THz) que les horloges à césium. Mais, seules quelques rares transitions sont adaptées ; celles qui ont lieu entre des niveaux d'énergie de longues durées de vie. Il faut donc trouver les atomes qui possèdent de telles transitions et que ces atomes puissent être refroidis à des températures inférieures à 10 μ K. Des travaux sont actuellement menés sur les atomes hydrogène, calcium, magnésium, strontium, sur les ions indium, ytterbium, mercure... Les résultats en stabilité de fréquence court ou moyen terme atteignent des niveaux comparables aux meilleures horloges micro-ondes et leurs exactitudes se rapprochent des fontaines atomiques.

Une des difficultés majeures sur l'utilisation des horloges optiques concerne l'accessibilité de leurs fréquences. Les horloges micro-ondes, comme les horloges à césium, bénéficient de tous les développements de l'électronique pour transmettre, modifier, comparer le signal d'horloge sans dégradation. En optique, les moyens disponibles n'ont pas encore atteints la maturité de leurs homologues « basses-fréquences ». Cependant, une étape décisive a été franchie, il y a quelques années, avec l'évolution des lasers impulsions femto-secondes. Ce dispositif permet de raccorder, en une seule étape, les fréquences micro-ondes aux fréquences optiques alors qu'il fallait auparavant toute une chaîne de synthèse de fréquences complexe à la fois sur le plan technique et sur le plan opérationnel. Les premières comparaisons des fontaines atomiques avec les horloges optiques, au niveau de 10^{-15} , sont attendues. La fontaine transportable puis la mission ACES seront des acteurs indispensables pour ces comparaisons.

Les retombées de cette course aux performances sont considérables sur le plan scientifique. Il faut garder à l'esprit que les horloges sont de formidables outils pour étudier les structures atomiques et leurs stabilités. La résolution de plus en plus fine des mesures de fréquences ou de temps oblige à se placer dans le cadre de la relativité générale ou de théories plus récentes et par la même à valider leurs contenus. De nouvelles applications émergent de ces travaux sur les horloges comme les systèmes de positionnement et de navigation : le système GPS (Global Positioning System) ou le futur système européen GALILEO....

Références

- [1] L. Essen, J.V.L. Parry, The caesium resonator as a standard of frequency and time, *Phil. Trans. Royal Soc., London, A*, 250, 45-69, 1957.
- [2] N. Ramsey, Molecular beam resonance method with separated oscillating fields, *Phys. Rev.* 78, 695-698 (1950).
- [3] N. Ramsey, *Molecular Beams*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1985.
- [4] S. Chu, The manipulation of neutral particles. *Rev. Mod. Phys.*, 70, 685-706, 1998.
- [5] C. Cohen-Tannoudji, Manipulating atoms with photons, *Rev. Mod. Phys.*, 70, 707-720, 1998.
- [6] W. Phillips, Laser cooling and trapping of neutral atoms, *Rev. Mod. Phys.*, 70, 721-742, 1998.
- [7] M. Kasevich, E. Riis, S. Chu, R. de Voe, RF spectroscopy in an atomic fountain, *Phys. Rev. Lett.*, 63, 612-615, 1989.
- [8] A. Clairon, C. Salomon, S. Guellati, W. Phillips, Ramsey resonance in a Zacharias fountain, *Europhys. Lett.*, 16, 165-170, 1991.
- [9] G. Santarelli, C. Audoin, A. Makdissi, P. Laurent, G.J. Dick, A. Clairon, Frequency stability degradation of an oscillator slaved to a periodically interrogated atomic resonator, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control* 45, 887-894, 1998.
- [10] A.N. Luiten, A. Mann, M. Costa, D. Blair, Power stabilized cryogenic sapphire oscillator, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 44, 132-135, 1995.
- [11] G. Santarelli, P. Laurent, P. Lemonde, A. Clairon, A. Mann, S. Chang, A.N. Luiten, C. Salomon, Quantum projection noise in an atomic fountain: a high stability cesium frequency standard, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 4619-4622, 1999.
- [12] W. Itano, J. Bergquist, J. Bollinger, J. Gilligan, D. Heinzen, F. More, M. Raizen, D.J. Wineland, Quantum projection noise: population fluctuations in two-level systems, *Phys. Rev. A* 47, 3554-3570, 1993.
- [13] P. Laurent, P. Lemonde, E. Simon, G. Santarelli, A. Clairon, N. Dimarcq, P. Petit, C. Audoin, C. Salomon, A cold atom clock in absence of gravity, *Eur. Phys. J. D* 3, 201-204, 1998.
- [14] M. Niering *et al.*, Measurement of the hydrogen 1s-2s transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock, *Phys. Rev. Lett.* 84, 5496-5499, 2000.
- [15] J. Prestage, R. Tjoelker, L. Maleki, Atomic clocks and variations of the fine structure constant, *Phys. Rev. Lett.* 74, 3511-3514, 1995.
- [16] D. Wineland, J. Bollinger, W. Itano, F. More, spin squeezing and reduced quantum noise in spectroscopy, *Phys. Rev. A* 46, R6797-6800, 1992.

Le Temps Atomique International

Bernard GUINOT

Bureau des longitudes

Observatoire de Paris

61, avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

e-mail : guinot.bernard@wanadoo.fr

ABSTRACT.— *The atomic time was born in 1955 with the first operational cesium frequency standard. The atomic time scale generated by the Bureau International de l'Heure was officially recognized by the 14th Conférence Générale des Poids et Mesures in 1971 and designated by International Atomic Time (TAI). The paper recalls the history of TAI and describes the world-wide cooperation, under the responsibility of the Bureau International des Poids et Mesures since 1988, for the construction and dissemination of TAI. Examples of the most demanding applications of TAI are given.*

Introduction

Le Temps atomique international (TAI) mérite son qualificatif « international » de deux manières : par l'usage mondial de cette référence temporelle et par sa production fondée sur la coopération permanente de tous les laboratoires horaires de la Terre, lorsqu'ils sont équipés d'horloges atomiques. Après un rappel historique, c'est le *système* de construction et de dissémination du TAI qui sera décrit ici, sans aborder les problèmes scientifiques sous-jacents qui relèvent principalement de la statistique, de la relativité générale, de la géodésie spatiale, de la propagation des signaux. A propos de ces deux derniers thèmes, je mentionne que l'unité de travail tend à être le dixième de nanoseconde (pour assurer la nanoseconde) et que pendant cette durée, la lumière parcourt 3 cm. La communication se terminera par quelques exemples d'applications du TAI choisies parmi les plus exigeantes.

Naissance du Temps Atomique International

Pour réaliser une échelle de temps, la qualité essentielle d'un étalon de fréquence est son exactitude de fréquence. L'exactitude est, on le rappelle, l'aptitude à délivrer une fréquence en rapport connu avec une fréquence de transition d'un atome (ou d'une molécule) non perturbé. L'exactitude exclut toute dérive de fréquence qui, par intégration, engendrerait une divergence indéfinie entre l'échelle de temps réalisée et sa contre partie théorique (le *temps uniforme* dans le langage de la mécanique classique).

La stabilité de fréquence d'un étalon est son aptitude à conserver sa fréquence moyenne sur une durée mentionnée : c'est une fonction de cette durée. Des étalons très stables à court terme peuvent avoir une lente dérive en fréquence. Ces étalons peuvent apporter une contribution utile à la réalisation d'échelles de temps, mais ils ne peuvent suffire. On peut noter que l'exactitude garantit la stabilité de fréquence sur une durée aussi longue que l'on veut.

Les travaux fondamentaux qui ont conduit aux étalons à césium ont été entrepris aux U.S.A. dans les années 1930, notamment par Rabi et Ramsey (Forman, 1985). Mais c'est aux physiciens anglais Essen et Parry (1957) qu'il revint de faire fonctionner le premier étalon opérationnel. Des étalons à ammoniac avaient été construits auparavant, cependant ils ne satisfaisaient pas à l'exigence d'exactitude. L'inexactitude en fréquence de l'étalon d'Essen et Parry était de 10^{-9} (dans cet article, l'absence d'unité après les incertitudes rappelle qu'il s'agit de valeurs relatives). Dès 1956, d'autres étalons à césium entraient en service et l'inexactitude était bientôt réduite à 10^{-10} et moins. C'était, d'emblée, beaucoup mieux que ce que pouvait fournir la rotation terrestre, base du Temps universel UT1, dont la vitesse présente des irrégularités de 10^{-7} à 10^{-8} . C'était mieux aussi que l'unité de durée que l'on pouvait déduire des mouvements orbitaux des planètes et de la Lune qui n'était réalisée qu'à quelques unités de 10^{-9} près (concept du Temps des éphémérides TE).

Ces premiers étalons atomiques ne fonctionnaient qu'épisodiquement. Ils servaient à étalonner en fréquence des horloges stables (horloges à quartz) qui « gardaient le temps ». Le temps atomique était donc le fruit d'un calcul, d'une intégration portant sur la fréquence, et il n'apparaissait que sous la forme de corrections aux lectures des garde-temps. A cette époque, et jusque vers le milieu des années 1960, les comparaisons d'horloges distantes étaient fondées sur la réception de signaux horaires avec une incertitude de 1 ms. Ces signaux ne pouvaient pas être utiles pour comparer les fréquences, puisqu'il faut 4 mois pour qu'un écart de fréquence de 10^{-10} engendre un écart de temps de 1 ms. Heureusement, il existait des émissions radio de fréquences très stables (pour les communications et la navigation) dont les réceptions communes permettait des comparaisons de fréquence des étalons qui étaient rapides, pratiques et qui n'apportaient pas de dégradation. Il était alors possible de construire par le calcul un étalon moyen, présumé meilleur que chaque participant, et de s'en servir pour étalonner un garde-temps local. Le Bureau international de l'heure (BIH), qui avait son siège à l'Observatoire de Paris, ainsi que quelques autres laboratoires, avaient ainsi construit des échelles moyennes de temps atomique. Afin de faciliter les comparaisons entre ces échelles expérimentales, les décisions suivantes furent prises en 1961.

- Adoption d'une fréquence conventionnelle pour la transition hyperfine du césium 133 : 9 192 631 770 Hz. Cette valeur était fondée sur la détermination de la seconde des éphémérides (Markowitz *et al.*, 1958). Implicitement cette valeur définit une « seconde atomique » non officielle, mais elle fut conservée en 1967 pour la définition de la seconde du Système international d'unités SI. La durée de la seconde du SI actuelle est donc en accord avec la durée de la seconde du TE qui, elle-même, est voisine de la durée moyenne de la seconde de temps moyen (on dirait aujourd'hui de la seconde de UT1) pendant les 18^e et 19^e siècles.

- Adoption d'une origine commune fixée par la condition que les divers temps atomiques coïncident avec le UT2 (forme régularisée du UT1) le 1^{er} janvier 1958 à 0 h UT2.

Durant cette période d'expérimentation qui a duré jusqu'en 1965 environ, le temps atomique a d'abord servi à étudier la rotation terrestre, puis à coordonner les émissions de signaux horaires ; on a commencé aussi à l'employer comme référence pour l'orbitographie des satellites artificiels.

L'ère moderne du temps atomique qui commence vers 1965 est la conséquence de progrès accomplis dans les laboratoires de recherche, bien sûr, mais aussi de la production de masse par l'industrie d'étalons à césium très stables en fréquence, fiables et aptes à fonctionner en horloge, d'un coût assez bas pour que les laboratoires horaires puissent s'en procurer. Ces étalons ont notamment équipé les stations du système de navigation LORAN-C. Ils ont permis, d'une part, d'améliorer la synchronisation des stations d'une même chaîne, d'autre part de synchroniser les chaînes entre elles, dans l'Atlantique Nord d'abord, puis ailleurs. Le LORAN-C a eu un rôle majeur dans le développement du temps atomique. Sur des distances allant jusqu'à 1500 km, la durée de propagation des signaux du LORAN-C par onde de sol est stable à 1 microseconde près et il fut possible d'établir de proche en proche des liaisons intercontinentales à ce niveau de stabilité. Ces liaisons étaient étalonnées et contrôlées par des transports d'horloges à césium en marche sur des vols commerciaux.

En 1969, le BIH a redéfini son temps atomique moyen, tout en assurant la continuité, comme une moyenne des temps atomiques indépendants entre eux de plusieurs laboratoires nationaux (désignés TA(i), i étant l'acronyme du laboratoire). Rappelons quelques dates marquantes du développement ultérieur :

- 1971. Le TA(BIH) dont l'usage avait déjà été recommandé par divers organismes reçoit la consécration ultime par la 14^e Conférence générale des poids et mesures qui lui donne le nom de Temps atomique international. [L'échelle du BIH est continue depuis 1955. Bien qu'elle ait reçu divers noms, on peut lui donner rétrospectivement le nom de TAI] ;
- 1973. Calcul du TAI, non plus à partir des TA(i), mais en utilisant les données des horloges prises individuellement, suivant une organisation qui, pour l'essentiel, n'a pas changé depuis et qui sera décrite plus loin ;
- 1977. Asservissement de la fréquence du TAI sur les données des étalons les plus exacts (étalons primaires) ;
- 1983. Introduction des liaisons horaires par le Global Positioning System (GPS), réduisant les incertitudes à quelques dizaines de nanosecondes, puis à 10 ns environ ;
- 1988. Après des négociations entreprises en 1971, transfert de la responsabilité du TAI au Bureau international des poids et mesures où il bénéficie de la sécurité et du savoir-faire de l'organisation intergouvernementale chargée de la métrologie de base.

Le Temps Universel coordonné UTC

Avant de décrire l'organisation du système du TAI, il faut ouvrir une parenthèse sur l'UTC. Le TAI et l'UT1 divergent d'une manière imprévisible à cause des perturbations de la rotation de la lithosphère par les masses fluides de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans). Depuis qu'on dispose du temps atomique, l'UT1 prend un retard de 0,3 à 1 seconde par an sur le TAI. Pour les besoins de la navigation astronomique et pour des raisons sentimentales, on a voulu que l'échelle commune à toute l'humanité reste précisément en phase avec l'UT1, c'est-à-dire avec l'alternance des nuits et des jours. Cela a conduit à définir une échelle de compromis, l'UTC, qui a eu diverses formes depuis sa création en 1961 par les U.S.A et le Royaume-Uni. Après bien des discussions, la forme présente a été adoptée le 1^{er} janvier 1972 : l'UTC est égal au TAI corrigé d'un nombre entier de secondes de sorte que l'écart UTC – UT1 n'excède jamais 0,9 seconde, en valeur absolue. Ceci implique des sauts d'une seconde (seconde « intercalaire ») qui ont lieu irrégulièrement fin juin ou fin décembre.

Pour le public, l'UTC est la seule échelle de temps atomique visible. Il est diffusé par les signaux horaires de tous types. Il est, légalement ou de fait, la base des heures en usage, suivant le système des fuseaux horaires. En bref, tout le monde utilise l'UTC plus ou moins un nombre entier d'heures. Ceux qui ont besoin du TAI, en général pour des travaux scientifiques ou de haute technologie, doivent connaître le nombre entier de secondes, variable, à ajouter à l'UTC. Le système de l'UTC fonctionne bien, mais il est source de complication et l'on commence à s'en plaindre... Des évaluations de son utilité sont entreprises, dont il est impossible de prévoir ce qu'il en résultera.

En tous cas, dans ce qui suit, UTC et TAI sont considérés comme équivalents, toutes les données étant traitées modulo 1 seconde.

Le système du Temps Atomique International

Le TAI est produit mensuellement et, pour le mois m , il n'est disponible que vers le 20 du mois $m + 1$. Pour en disposer en temps réel, il faut, d'après les valeurs antérieures, extrapoler les valeurs d'UTC - H, où H représente l'horloge de l'utilisateur. L'horloge H doit avoir un optimum de stabilité de fréquence sur une durée de quelques dizaines de jours. Dans un laboratoire bien équipé, l'incertitude de l'extrapolation peut être de l'ordre de la dizaine de nanosecondes.

Les lectures des horloges qui contribuent au TAI ne sont vues par le BIPM qu'à travers un réseau de comparaison de temps. Pour des raisons évidentes, on ne traite que des différences de lectures simultanées qui varient lentement [Dans le nécessaire cadre relativiste, une convention de simultanéité est requise]. Le réseau a la forme suivante :

a) Chaque laboratoire i a une horloge maîtresse fournissant un UTC(i), extrapolation locale du UTC. Toutes ses mesures sont rapportées à l'UTC(i). Le BIPM reçoit les différences journalières des lectures d'horloges du laboratoire i et d'UTC(i).

b) Les UTC(i), UTC(j),... des laboratoires i , j ,... sont comparés entre eux, au moins journalièrement, par des techniques assurant une exactitude au niveau de la dizaine de nanosecondes. La réception des mêmes signaux du GPS, suivant un programme établi par le BIPM est la technique la plus répandue. On utilise aussi les signaux de l'équivalent russe du GPS, le GLONASS. Dans ces deux cas, les données de réception sont traitées par le BIPM, suivant des méthodes élaborées pour minimiser les incertitudes sur les durées de propagation (affectées par la réfraction et la géométrie). Une autre technique, en développement et prometteuse d'une meilleure exactitude, est l'échange de signaux croisés relayés par des satellites de télécommunications.

Ainsi, les différences de lectures deux à deux de toutes les horloges participantes sont connues, avec des incertitudes de 10 à 20 ns. Ces horloges sont au nombre de plus de 200, réparties dans une cinquantaine de centres. Elles comprennent en grande majorité des horloges à césium de construction industrielle, quelques horloges à césium de laboratoires et des masers à hydrogène (ces masers, bien que peu exacts en fréquence et affectés par une lente dérive, sont utiles grâce à leur très grande stabilité (10^{-15}) sur des durées d'une heure à quelques jours). Le BIPM dispose en outre des déterminations épisodiques de fréquence par des étalons primaires, par exemple sous la forme de différences de fréquence d'UTC(i) et de l'étalon primaire du laboratoire i . Toutes les données couvrant le mois m sont disponibles au BIPM vers le 15 du mois $m + 1$. Leur traitement statistique n'est pas décrit ici : on peut consulter à ce sujet (Audoin et Guinot, 1998) ou, pour plus de détails (Guinot et Thomas, 1988). Ce traitement est conçu pour utiliser au mieux chaque horloge et chaque étalon de fréquence pour que le TAI ait les qualités suivantes :

- a) pérennité ;
- b) stabilité de fréquence à long terme avec un optimum voisin de un mois (actuellement l'instabilité pour un mois est voisine de 10^{-15}) ;
- c) exactitude de fréquence comparable à celle des étalons primaires (actuellement, l'inexactitude est voisine de 10^{-14} , le TAI ne bénéficie pas pleinement de l'exactitude des meilleurs étalons (10^{-15}) car ceux-ci fonctionnent rarement et, de plus, les techniques d'accès à leur fréquence apportent des incertitudes non négligeables).

Il est à noter que les critères b) et c) sont quelque peu incompatibles car l'introduction brutale d'une correction de fréquence engendre une instabilité. Pour éviter cela, la condition c) est assurée par un « pilotage » doux, à long terme, ce qui explique aussi que l'exactitude du TAI ne reflète pas intégralement l'exactitude des meilleurs étalons. Cependant les étalons primaires jouent un rôle essentiel, maintes fois souligné par les organisations internationales, car les qualités à très long terme du TAI, en stabilité et en exactitude, reposent en totalité sur eux.

On pose souvent des questions relatives au poids statistique des diverses horloges ou des divers laboratoires qui contribuent au TAI. Ce qui vient d'être dit montre qu'il n'y a pas de réponse simple. En quelque sorte, les nombreuses horloges industrielles agissent comme un volant d'inertie dont la vitesse de rotation serait réglée par les étalons primaires.

Comment le TAI (ou l'UTC) est-il mis à la disposition de ses utilisateurs, au plus haut degré d'exactitude ?

Le résultat des calculs du BIPM a la forme de valeurs pour le mois m d'UTC - UTC(i), données de 5 en 5 jours. Ces valeurs, publiées vers le 20 du mois $m + 1$ dans les circulaires T du BIPM, ont des incertitudes de 10 à 50 ns selon les laboratoires. La lecture des UTC(i) constitue donc le mode d'accès primaire au TAI.

Les circulaires T donnent aussi les valeurs d'UTC - Temps du GPS et d'UTC - Temps du GLONASS, pour chaque jour à 0h UTC, avec des incertitudes de l'ordre de la dizaine de nanosecondes.. Ces temps sont diffusés par les satellites du GPS et du GLONASS et sont accessibles grâce à des récepteurs appropriés, avec des incertitudes qui dépendent de la qualité de l'équipement et des coordonnées géodésiques ; ces incertitudes peuvent être réduites à quelques dizaines de nanosecondes. En particulier, le Temps du GPS est normalement maintenu en étroit synchronisme avec le TAI (modulo 1 seconde), les écarts dépassant rarement 50 ns. De plus, le GPS diffuse une extrapolation de l'UTC. Ainsi, le GPS procure

un accès commode au TAI et à l'UTC, en temps réel, avec des incertitudes minimales de quelques dizaines de nanosecondes.

Le tableau I donne un court extrait de la Circulaire T 149 datée du 15 juin 2000. On y trouve les valeurs d'UTC - UTC(i) pour deux des cinquante laboratoires participants ainsi que quelques valeurs d'UTC - Temps du GPS. On peut obtenir l'ensemble des résultats du BIPM par l'Internet (voir références).

Date Oh UTC	UTC-UTC(OP) unité : nanoseconde	UTC-UTC(USNO) unité : nanoseconde	Date Oh UTC	TAI - Temps du GPS - 19s unité : nanoseconde
2000 mai 5	-16	11	2000 mai 5	5
10	-11	12	6	5
15	-17	10	7	7
20	-21	11	8	8
25	-23	10	9	10
30	-32	7	10	12

Table I. Exemple de résultats : OP, Observatoire de Paris, USNO, US Naval Observatory à Washington

Evidemment, le moins on est exigeant, le plus l'accès au TAI et au UTC est facile. Il existe encore des émissions de signaux horaires par radio, sur diverses fréquences (voir le Rapport annuel de la Section du temps du BIPM) ; elles diffusent toutes le UTC, avec des incertitudes à la réception de 1 ms à cause de la mauvaise connaissance que l'on a des durées de propagation. Les horloges parlantes, les heures fournies par la télévision et les stations de radiodiffusion sont toutes, dans le monde entier, calées sur UTC +/- un nombre entier d'heures. L'UTC et le TAI tombent du ciel...

Cette facilité offerte aux utilisateurs du temps ne doit pourtant pas conduire à oublier ceux qui le produisent. Les travaux métrologiques, que ce soient la construction d'étalons de fréquence ou d'autres grandeurs, font appel à la physique de pointe et ils demandent une méticulosité extrême. Toutefois, on a habituellement le temps d'analyser les causes d'erreurs, d'y remédier, de perfectionner les instruments et de refaire les expériences. Mais la construction du TAI a un caractère bien particulier : elle doit se faire en temps quasi réel et, de plus, dès que le TAI est sorti du BIPM, il est figé à tout jamais. Si une erreur a été commise, quelque soit sa source, dans les laboratoires participants, dans les transmissions de données, au BIPM, elle est fossilisée. Cet aspect du travail n'est pas le moindre souci de ceux qui en sont chargés.

Quelques utilisations du Temps Atomique International

Lorsqu'on fait des mesures purement locales (en temps propre au sens relativiste), une échelle de temps devrait être telle que la différence de deux dates exprime une durée dans l'unité habituelle, la seconde du SI. Il n'y a pas, alors, de distinction fondamentale entre intervalle de temps et échelle de temps. L'usage des dates est simplement une commodité qui laisse la liberté de choisir l'origine du temps (le t_0) la plus commode. Il en va différemment dans le modèle de la relativité générale auquel on doit faire appel pour les applications très précises. La date n'est plus qu'une lecture de graduation d'un axe de coordonnée qui n'a pas de signification physique directe. Ce que l'on cherche à obtenir, à l'aide du TAI, c'est la réalisation d'un système de graduation aussi fidèle que possible à la théorie. La notion d'échelle de temps prend alors tout son sens.

Le TAI, utilisé sur toute la Terre et dans son environnement, ne répond pas à la définition d'un temps local. Il a une définition relativiste de coordonnée temporelle (temps-coordonnée) qui doit être utilisée dans la plupart des applications très exigeantes que l'on va donner en exemple.

- Etude de la rotation et des mouvements orbitaux des pulsars (et tests relativistes associés, Taylor *et al.*, 1992). Dans cette application, les défauts du TAI peuvent ne pas être négligeables.
- Représentation de l'argument temporel des théories planétaires, après transformations relativistes (éphémérides astronomiques, application aux explorations planétaires).
- Etude de la rotation terrestre (application aux mouvements des fluides de la Terre, à l'étude de l'évolution à long terme de notre planète et de son climat).

- Orbitographie des satellites artificiels (nombreuses et importantes applications à la géodésie centimétrique et globale, à la navigation, à l'étude de la constitution interne de la Terre, au niveau des mers, à la climatologie, à des tests relativistes).
 - Base de synchronisation et de syntonisation de systèmes (télécommunications, stations d'observation diverses, systèmes de positionnement).
 - Base de distribution de l'unité de temps et des fréquences (En temps réel, des fréquences porteuses radio sont exactes à 10^{-12} près. En temps différé, par l'intermédiaire de la réception du temps, les incertitudes peuvent être réduites à 10^{-14} . En outre, les publications du BIPM donnent accès à la fréquence de chaque étalon primaire).
- ... et, comme cela a été dit, le TAI, via l'UTC, est la base de toutes les heures en usage, avec son cortège d'applications dans la vie commune.

Conclusion

Certes, la construction des échelles de temps n'est qu'un des emplois des étalons atomiques de fréquence qui ont, directement ou non, d'innombrables autres usages scientifiques et techniques qui n'entrent pas dans le cadre de cet exposé. Mais c'est une application très importante en soi et aussi par l'abandon du cours des astres pour la mesure du temps.

Je sais qu'il y a des flambeaux célestes, et des astres qui nous marquent les saisons, les temps, les ans et les jours. Je ne conteste point cette vérité ; et je ne voudrais pas dire aussi, que cette roue du potier fût ce même temps que nous appelons le jour : mais il ne s'ensuit pas de là que ce ne soit pas un temps (Confessions, Saint-Augustin, Livre XI, Chap. XXIII).

Références

Ouvrages généraux :

Audoin C., Guinot B., Les fondements de la mesure du temps (Comment les fréquences atomiques règlent le monde), 1998, Masson (300 p.)

Le Système international d'unités, 7^e édition, 1998, Bureau international des poids et mesures, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex.

Publications du BIPM sur le temps :

Circulaire T, mensuelle

Rapport annuel de la Section du temps

Le contenu de ces publications est disponible sur l'Internet :

<http://www.bipm.fr> ou anonymous ftp to 62.161.69.5 (subdirectory TAI)

Articles :

Essen L., Parry J.V.L., 1957, The caesium resonator as a standard of frequency and time, Phil. Trans. R. Soc. London, Series A, 250, 45-69.

Forman P., 1985, Atomichron : The Atomic Clock from Concept to Commercial Product, Proc ; IEEE, 73, 1181-1204.

Guinot B, Thomas C., 1988, Establishment of the International Atomic Time, in Annual Report of the BIPM Time Section, Vol.1, BIPM ed.

Markowitz W., Hall R.G., Essen L., Parry J.V.L., 1958, Frequency of Cesium in terms of Ephemeris Time, Phys. Rev. Letter, 1, 105-107.

Taylor J.H., Wolszczan A., Damour T., Weisberg J.M., 1992, Experimental constraints on strong field relativistic gravity, Nature, 355, 132.

Horloges dans l'espace et applications à la physique fondamentale : le projet ACES

Ch. SALOMON , *Laboratoire Kastler-Brossel [ENS-LKB]*
N. DIMARCQ , *Laboratoire de l'Horloge Atomique [LHA]*
A. CLAIRON, P. LAURENT, P. LEMONDE, G. SANTARELLI, P. UHRICH ,
Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences [BNM-LPTF]
L.G. BERNIER, G. BUSCA, P. THOMANN , *Observatoire Cantonal de Neuchâtel [ON]*
E. SAMAIN , *Observatoire de la Côte d'Azur [OCA – CERGA]*
P. WOLF , *Bureau International des Poids et Mesures [BIPM]*
F. GONZALEZ, Ph. GUILLEMOT, S. LEON, *Centre National d'Etudes Spatiales [CNES]*
S. FELTHAM , *European Space Agency - ESTEC*

ENS-LKB, 24 rue Lhomond, 75231 Paris cedex 5, France

LHA, Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire 75014 Paris, France

BNM-LPTF, Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire 75014 Paris, France

ON, rue de l'Observatoire 58, 2000 Neuchâtel, Switzerland

OCA-CERGA, 2130 route de l'Observatoire 06460 Caussols, France

BIPM, Pavillon de Breteuil, 92312 Sèvres cedex, France

CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31402 Toulouse, France

ESA / ESTEC, Keplerlaan, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands

Corresponding author : noel.dimarcq@obspm.fr

I INTRODUCTION

ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) est une mission spatiale européenne dont l'objectif est de faire fonctionner des horloges ultrastables à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS). La date de lancement est prévue en 2005. Le PI (Principal Investigator) d'ACES est Christophe Salomon (ENS-LKB) et la communauté internationale des utilisateurs d'ACES est coordonnée par Pierre Thomann (Observatoire de Neuchâtel). Dans cet article, les instruments et équipements embarqués sont brièvement décrits (Paragraphe II). Les performances des horloges et des moyens de transfert entre le sol et l'espace sont présentées. Dans le paragraphe III, les principaux objectifs scientifiques d'ACES sont présentés, en insistant sur les applications en physique fondamentale.

II DESCRIPTION DU SYSTEME ACES

La charge utile d'ACES (Figure 1) inclut deux horloges ultrastables :

- **PHARAO (Projet d'Horloge Atomique à Refroidissement d'Atomes en Orbite)**
PHARAO est une horloge à atomes de césium refroidis par laser conçue par les trois laboratoires BNM-LPTF, ENS-LKB, LHA avec le soutien du CNES
- **SHM (Space Hydrogen Maser)**
SHM est un maser actif à hydrogène conçu par l'Observatoire de Neuchâtel avec le soutien de l'ESA.

Les fréquences de ces deux horloges peuvent être comparées à bord dans le FCDP (Frequency Comparison and Distribution Package). Elles peuvent être aussi comparées à celles d'horloges basées sur Terre en utilisant soit un lien optique T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser) soit un lien micro-onde MWL (MicroWave Link).

Parmi les différents instruments installés à bord, deux jouent un rôle particulièrement important :

- le **M3D** (Microvibration and Magnetic Measurement Device) qui permet de mesurer l'environnement accélérométrique et magnétique des horloges.
- le **POD** (Precise Orbit Determination) qui détermine avec précision l'orbite des horloges.

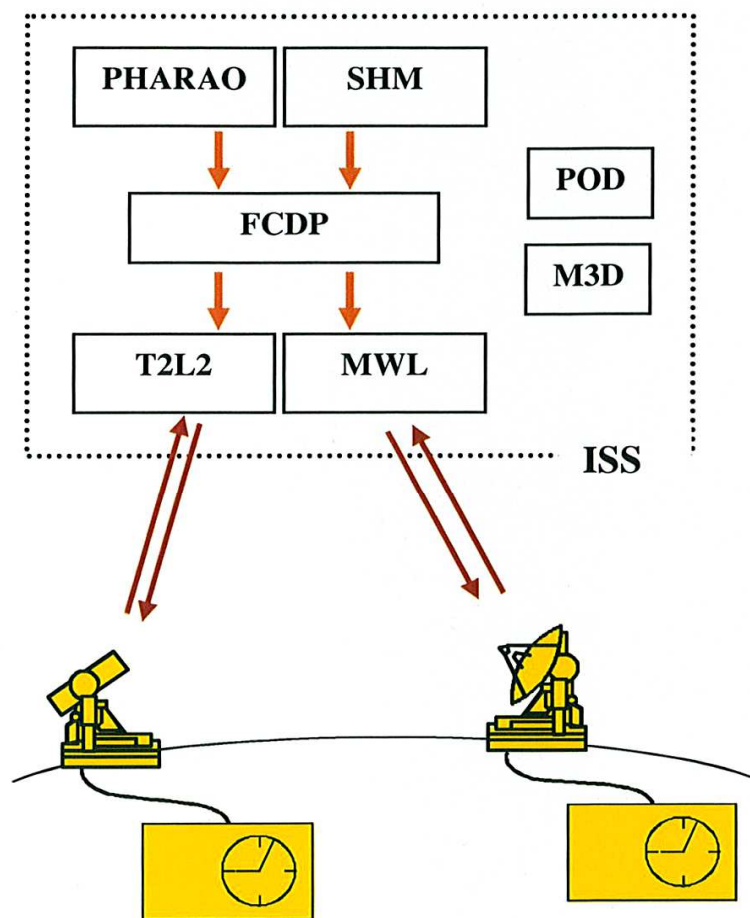


Fig. 1 Le système ACES

La charge utile d'ACES sera installée sur une "Express Pallet" placée sur la poutre de la station (Figure 2) et sera orientée Nadir pour que les liens aient une vue directe avec le sol. De volume voisin de 1 m³, elle doit avoir une masse inférieure à 220 kg et consommer une puissance électrique inférieure à 450 W.

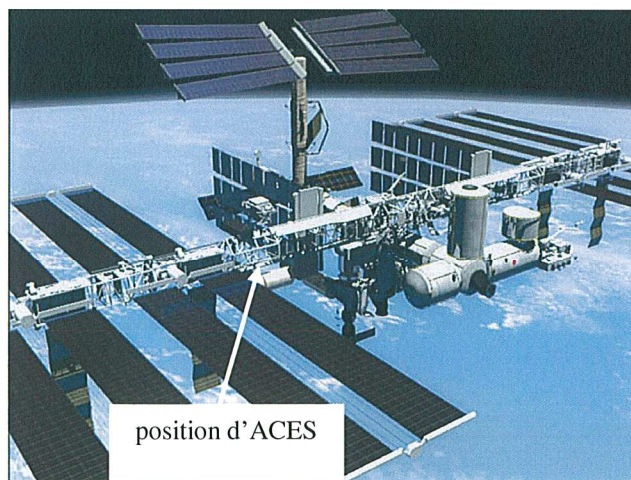


Figure 2 Position de la charge utile ACES sur la station spatiale internationale

II. 1. Performance en fréquence des horloges d'ACES

La fréquence f délivrée par une horloge atomique est caractérisée par sa stabilité (fluctuations dans le temps de la fréquence relative : $y = \delta f/f$) et par son exactitude (incertitude $\Delta f/f$ sur les déplacements systématiques de la fréquence par rapport à une valeur idéale). La stabilité de fréquence, généralement évaluée grâce à la variance à deux échantillons dite variance d'Allan, est très importante pour le positionnement par satellite, la syntonisation d'horloges, les échelles de temps atomique, l'interférométrie à très longue base, etc... L'exactitude d'une horloge est importante pour la synchronisation d'horloge, la construction des échelles de temps atomique et certains tests de physique fondamentale.

➤ PHARAO

La stabilité de fréquence de l'horloge à atomes froids PHARAO devrait correspondre à un écart type d'Allan meilleur que $\sigma_y(\tau) = 10^{-13} \cdot \tau^{-1/2}$ pour une durée d'intégration τ (Figure 3). Cette valeur correspond à une stabilité de fréquence meilleure que $3 \cdot 10^{-16}$ pour un jour d'intégration et meilleure que $1 \cdot 10^{-16}$ pour 10 jours. L'exactitude de PHARAO est attendue au niveau de 10^{-16} .

➤ SHM

La stabilité de fréquence du maser à hydrogène SHM est attendue au niveau de (Figure 3) :

$$\begin{aligned} \sigma_y(\tau = 1 \text{ s}) &\leq 1.5 \times 10^{-13} \\ \sigma_y(\tau = 10 \text{ s}) &\leq 2.1 \times 10^{-14} \\ \sigma_y(\tau = 100 \text{ s}) &\leq 5.1 \times 10^{-15} \\ \sigma_y(\tau = 1\,000 \text{ s}) &\leq 2.1 \times 10^{-15} \\ \sigma_y(\tau = 10\,000 \text{ s}) &\leq 1.5 \times 10^{-15} \end{aligned}$$

La combinaison des deux horloges PHARAO et SHM permettra de construire une échelle de temps unique dont la stabilité à court et moyen terme est assurée par SHM et dont la stabilité long terme ainsi que l'exactitude sont assurées par PHARAO.

II.2. Comparaison de fréquences d'horloge avec ACES

ACES dispose de liens Temps-Fréquences (T&F) permettant d'effectuer des comparaisons entre les horloges sol et les horloges spatiales. Ces liens – optique et micro-onde – doivent permettre de transférer sans dégradation les signaux délivrés par les horloges.

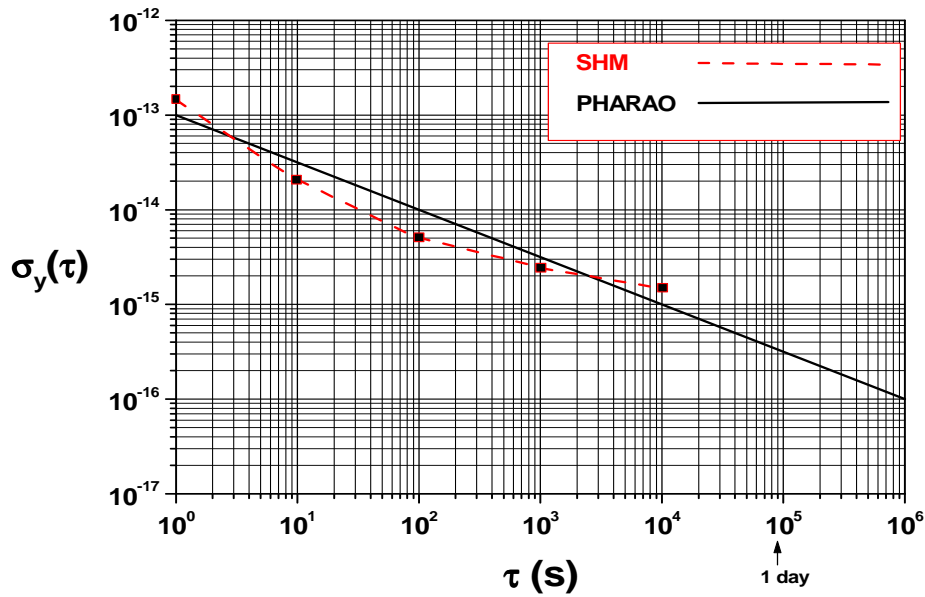


Fig. 3 Ecart-type d'Allan de PHARAO et SHM

A partir de ces comparaisons sol-espace, il sera possible d'effectuer des comparaisons d'horloges fonctionnant au sol mais trop distantes pour être directement comparées. Ces comparaisons sol-sol peuvent être faites en :

- vue commune (Figure 4-a)

On compare simultanément les deux horloges sol A et B à une même horloge spatiale. La performance de l'horloge spatiale n'est pas importante car elle n'intervient pas dans le bilan final. Seule la stabilité du lien sur la durée de la comparaison est importante. Cette technique est déjà utilisée pour comparer des horloges sol via des satellites GPS. La technique en vue commune nécessite que les horloges sol voient en même temps le satellite. Dans le cas de la Station Spatiale Internationale (faible altitude : 400 km), elle ne permettra pas d'effectuer des comparaisons à des distances intercontinentales.

- vue non-commune (Figure 4-b)

On compare à un instant t l'horloge sol A à l'horloge spatiale. Puis, l'horloge sol B est comparée à l'horloge spatiale après un délai Δt . Le bruit de phase apporté par cette technique est la somme des bruits du lien lors des deux comparaisons et du bruit de phase de l'horloge spatiale accumulé pendant la durée Δt . Grâce à la très bonne stabilité à moyen et long terme de l'ensemble (PHARAO + SHM), il sera possible d'effectuer des comparaisons d'horloges sol en vue non-commune au niveau

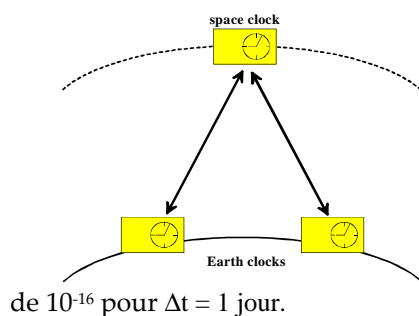


Fig. 4-a : Comparaison d'horloges sol en vue commune

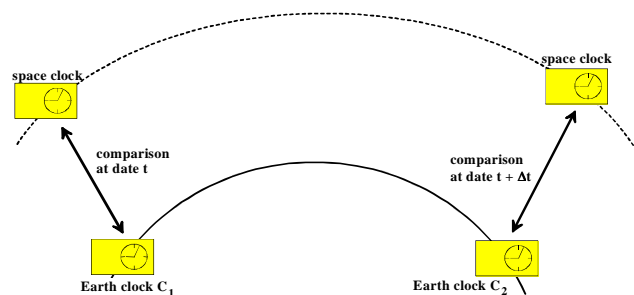


Fig. 4-b : Comparaison d'horloges sol en vue non commune

a) **Performances des liens Temps-Fréquence (T&F) sol-espace pour ACES**

Les liens T&F d'ACES permettent d'effectuer des comparaisons de fréquences (ou d'intervalles de temps) entre les horloges spatiales et les horloges sol.

Un lien T&F est caractérisé par sa stabilité (en fréquence ou en temps) et par son exactitude en temps. La stabilité d'un lien correspond aux fluctuations au cours du temps de la distance électrique entre les deux horloges. Ces fluctuations ont en général pour origine les variations des délais instrumentaux des émetteurs et récepteurs ainsi que les variations des délais liés à la propagation dans la troposphère et l'ionosphère. La stabilité en fréquence peut être évaluée par l'écart-type d'Allan $\sigma_y(\tau)$. La stabilité en temps peut être évaluée par la variance temporelle (écart-type $\sigma_x(t)$) où les fluctuations de fréquence et de temps sont reliées par $y = dx/dt$. L'exactitude d'un lien est l'incertitude sur la connaissance de la valeur absolue du temps de propagation des signaux entre deux points de référence. Elle inclut la connaissance des retards troposphériques, ionosphérique ainsi que la calibration des retards instrumentaux.

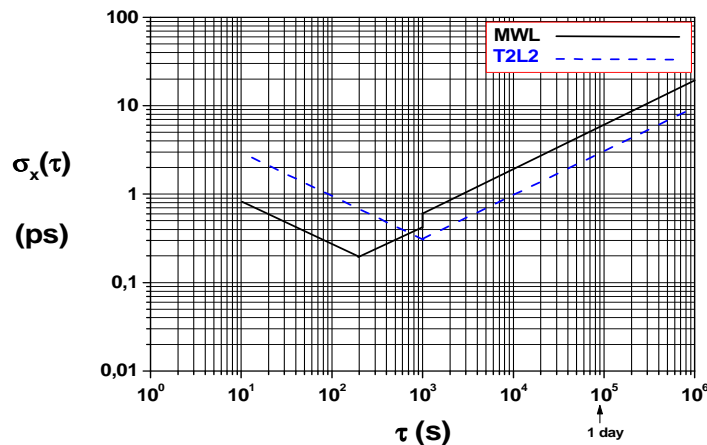
Les objectifs scientifiques d'ACES reposent sur des syntonisations d'horloges, c'est-à-dire des comparaisons de fréquence (ou d'intervalles de temps) et ne nécessitent donc que la stabilité des liens. Toutefois, il pourrait être très intéressant d'effectuer des synchronisations, c'est-à-dire des comparaisons d'échelles de temps d'horloges sol. Dans ce cas, le lien optique devrait permettre une synchronisation d'horloge sol avec une incertitude de 50 ps, soit 20 fois mieux que les synchronisations d'horloges avec GPS.

Afin d'induire une dégradation réduite (inférieure à 20 %) dans les comparaisons bord sol, les liens T&F doivent avoir un écart-type temporel dont les variations avec la durée d'intégration sont montrées sur la figure 5. Etant donnée la faible altitude de la Station Spatiale ISS, la comparaison entre une horloge sol et les horloges ACES va reposer sur de courtes sessions de comparaison (typiquement 300 secondes qui est la durée moyenne de visibilité d'ISS au-dessus d'un point donné) séparées par des temps morts importants (au moins 90 minutes qui est la période d'orbite). Les fluctuations de temps induites par les moyens de transfert doivent être typiquement plus petites que 10 ps pour un jour d'intégration, soit dix fois mieux que les comparaisons effectuées avec des récepteurs GPS-géodésiques mesurant les phases des porteuses.

b) **Le lien optique T2L2**

Le principe d'opération de T2L2, conçu par l'Observatoire de la Côte d'Azur est simple. Une station laser émet depuis le sol des impulsions laser. A bord d'ISS, ces impulsions sont détectées et partiellement rétro réfléchies à l'aide d'un réflecteur coin de cube. Pour chaque impulsion laser, trois datations sont effectuées :

- date T_0 d'émission de l'impulsion (date dans l'échelle de temps de l'horloge sol) ;
- date T_1 de réception à bord (date dans l'échelle de temps de l'horloge bord) ;
- date T_2 de réception de l'impulsion rétro réfléchie (date dans l'échelle de temps de l'horloge sol).



• Fig. 5 Ecart-type temporel de T2L2 et MWL

La comparaison des échelles de temps des horloges sol et bord repose sur la connaissance d'un ensemble de triplets de dates (T_0 , T_1 , T_2) pour un grand nombre d'impulsions laser. Le fonctionnement aller-retour ("Two-way") de T2L2 permet une élimination automatique des délais ionosphériques et troposphériques affectant la propagation.

c) Le lien micro-onde MWL

Les moyens actuels de comparaison d'horloges par des moyens micro-ondes (GPS, "Two-way satellite time transfer") ne permettent pas de comparer des horloges au niveau de 10^{-16} sur un jour. Un système spécifique est en cours de développement dans le cadre du projet ACES. Le principe est une version améliorée du lien utilisé lors de l'expérience Gravity Probe A au cours de laquelle la fréquence d'un maser à hydrogène fonctionnant au sol était comparée à celle d'un maser à hydrogène embarquée dans une fusée [1-2]. Des comparaisons de fréquence au niveau de $8 \cdot 10^{-15}$ avaient alors été possibles. Les améliorations portent essentiellement sur la réduction des fluctuations des délais instrumentaux et sur une meilleure réjection des fluctuations des délais liés à la propagation (effet Doppler du 1^{er} et 2nd ordre, effet Sagnac, délais ionosphériques et troposphériques, ...)

III OBJECTIFS SCIENTIFIQUES D'ACES.

Les objectifs d'ACES sont :

- la démonstration des hautes performances d'une nouvelle génération d'horloges atomiques (PHARAO, SHM) : stabilité et exactitude au niveau de 10^{-16} ;
- la démonstration des hautes performances de nouveaux types de moyens de transfert de temps et/ou de fréquence (T2L2, MWL) ayant une stabilité temporelle meilleure que 10 ps par jour ;
- la comparaison des horloges spatiales à des horloges sol pour effectuer des tests de physique fondamentale et améliorer les échelles de temps atomiques actuellement existantes.

III-1. Déroulement de la mission.

La mission ACES inclut deux phases :

- Première phase (durée 6 mois) : phase de caractérisation
Dans cette phase, les performances des horloges spatiales et des liens T&F seront évaluées grâce à des comparaisons à bord ou des comparaisons avec des horloges fonctionnant au sol (utilisation de méthodes différentielles permettant de séparer les sources de bruit provenant des horloges ou des liens).
- Deuxième phase (durée 12 → 30 mois) : phase d'utilisation
Dans cette phase, de nombreuses expériences seront effectuées, mettant toutes en œuvre des comparaisons, à l'échelle mondiale, entre les horloges spatiales d'ACES et des horloges ultrastables fonctionnant dans les laboratoires de Métrologie du Temps et des Fréquences. Des groupes de travail ont été formés pour identifier les applications d'horloges spatiales ultrastables dans différents domaines :
 - physique des atomes froids
 - effets relativistes
 - détermination précise d'orbite
 - transfert de temps laser
 - transfert de temps micro-onde
 - métrologie du temps et des fréquences
 - géodésie
 - observation de la Terre.

Parmi les applications les mieux identifiées à l'heure actuelle, les tests de physique fondamentale occupent une place essentielle.

III-2. Tests de physique fondamentale

a) Effets relativistes affectant les horloges atomiques

A cause d'effets relativistes (décalage gravitationnel, effet Doppler du 2nd ordre), la fréquence propre d'une horloge diffère par un écart relatif $\Delta f/f$ de la valeur coordonnée f qu'elle aurait dans un référentiel géocentrique inertiel isotrope (GRS) :

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{c^2} \left(U + \frac{v^2}{2} \right) \quad \text{Eq.(1)}$$

où c est la vitesse de la lumière, v est la vitesse coordonnée de l'horloge dans GRS et U est le potentiel gravitationnel à la position de l'horloge ($U > 0$ suivant la convention de l'Union Astronomique Internationale). Le décalage gravitationnel vaut $-6.9 \cdot 10^{-10}$ pour une horloge fonctionnant au sol et $-6.5 \cdot 10^{-10}$ pour une horloge à bord d'ISS à 400 km d'altitude. Le décalage par effet Doppler du 2nd ordre vaut $-1.3 \cdot 10^{-12}$ pour une horloge fonctionnant au sol et $-3.3 \cdot 10^{-10}$ pour une horloge à bord d'ISS dont la vitesse est de l'ordre de 7 km.s^{-1} .

Afin de déterminer ces déplacements de fréquence relativistes avec une précision compatible avec la stabilité et l'exactitude des horloges, l'orbite des horloges bord et sol participant aux comparaisons doit être complètement connue avec une incertitude inférieure à :

- 0.5 m (moyenne sur 10 jours) pour l'altitude de la station spatiale,
- 0.6 mm.s^{-1} (moyenne sur 10 jours) pour la vitesse.

b) Effets relativistes affectant les liens T&F

Les comparaisons de fréquence entre l'horloge spatiale et une horloge sol seront effectuées par un lien optique (T2L2) ou micro-onde (MWL). Ces deux liens reposent sur le principe du transfert "Two-way" (une voie montante et une voie descendante) pour éliminer l'effet Doppler du 1^{er} ordre et les délais de propagation dans l'atmosphère. Toutefois, le lien est affecté par des effets relativistes suivant la relation [1-2]:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{c^2} \left[-U_E(\vec{w}_S) + U_E(\vec{w}_E) - \frac{|\vec{v}_E - \vec{v}_S|^2}{2} - \vec{r}_{SE} \cdot \vec{a}_E \right] + o\left(\frac{1}{c^3}\right) \quad \text{Eq. (2)}$$

Dans l'équation (2), $U_E(\vec{w}_S)$ est le potentiel gravitationnel (créé par la Terre) à la position \vec{w}_S de l'horloge spatiale et $U_E(\vec{w}_E)$ est le potentiel gravitationnel à la position \vec{w}_E de l'horloge au sol. Ces coordonnées sont données dans le référentiel GRS. \vec{v}_S (resp. \vec{v}_E) est la vitesse coordonnée de l'horloge spatiale (resp. sol). \vec{r}_{SE} est le rayon vecteur entre les deux horloges et \vec{a}_E est l'accélération de la Terre dans GRS.

Le premier terme $[-U_E(\vec{w}_S) + U_E(\vec{w}_E)]/c^2$ de l'équation (2) décrit l'influence du potentiel gravitationnel induit par la Terre. Pour l'orbite d'ISS, ce terme est de l'ordre de $+4.6 \cdot 10^{-11}$. Le second terme $|\vec{v}_E - \vec{v}_S|^2/2c^2$, décrivant l'influence de l'effet Doppler du 2nd ordre vaut environ $-3.3 \cdot 10^{-10}$. Le troisième terme $(\vec{r}_{SE} \cdot \vec{a}_E)/c^2$ est la contribution de l'effet Sagnac ; elle est maximale pour une station sol sur l'équateur et vaut alors $7 \cdot 10^{-13}$.

L'évaluation de ces déplacements de fréquence requiert une détermination de l'orbite des horloges durant chaque session de comparaison (de durée moyenne 300 s) avec une incertitude de :

- 24 m pour l'altitude de la station spatiale,
- 26 mm.s^{-1} pour la vitesse.

L'équation (2) est valide jusqu'à l'ordre (c^2). Toutefois, pour des comparaisons de fréquences d'horloges à 10^{-16} , la contribution de termes du troisième ordre (en c^3) doit être incluse dans l'équation (2) en multipliant le membre de droite par $\left[1 + c^{-1} \frac{\bar{v}_S - \bar{v}_E}{\bar{v}_E}\right]$. Ce facteur peut être interprété [3-4] comme une correction d'effet Doppler qui est maximale à basse élévation. Cette correction, inférieure à $2.7 \cdot 10^{-5}$ conduit à une correction de fréquence de l'ordre de $1.2 \cdot 10^{-15}$.

c) Mesure du décalage gravitationnel

De nombreux tests visant à mesurer précisément le décalage gravitationnel ont déjà effectués. Leur but est de vérifier l'équation (1) et de tester la relativité générale d'Einstein en vérifiant si le premier paramètre post-newtonien α est nul ou non. Pound et Rebka avaient fait une détermination directe de cet effet en 1960 en utilisant l'effet Mossbauer. Leur résultat confirmait les prédictions théoriques de la théorie de la relativité d'Einstein à ± 1 %.

La mesure la plus précise à ce jour a été effectuée par Vessot, Levine *et al.* [1-2] lors de l'expérience Gravity Probe A (GPA) réalisée en 1978 qui visait à mesurer la modulation du décalage gravitationnel d'un maser à hydrogène embarqué dans une fusée en vol balistique. Dans ce cas, seules les stabilités du maser embarqué et du maser de référence basé au sol étaient importantes.

Dans le cas d'ACES, le principe de mesure sera différent : grâce à l'excellente exactitude de PHARAO et des horloges à atomes froids fonctionnant au sol, il sera possible d'effectuer une mesure absolue du décalage gravitationnel avec une incertitude relative de $3 \cdot 10^{-6}$, soit un gain en sensibilité d'un facteur 25 par rapport à GPA.

d) Recherche d'une dérive éventuelle de la constante de structure fine α

La constante de structure fine $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ {égale à $1/137.0359895(61)$ } caractérise la force de l'interaction électromagnétique dans un atome ou une molécule et intervient dans la valeur de la fréquence délivrée par une horloge. En 1937, Dirac suggéra qu'il serait intéressant de vérifier si les constantes fondamentales étaient réellement constantes dans le temps. Une dérive des constantes fondamentales, et en particulier de α , serait une violation du principe d'équivalence [5].

Le principe du test proposé consiste à mesurer l'évolution des fréquences d'horloges au cours du temps. Une dérive de fréquence peut avoir pour origine soit la dérive de α soit des imperfections à long terme affectant le fonctionnement de l'horloge. Pour lever cette ambiguïté, il suffit de comparer les fréquences d'horloges de types différents (horloges à atomes de césium ou rubidium froids, masers à hydrogène, horloges à ions piégés, horloges optiques, ...). En effet, l'effet d'une dérive de α sur l'évolution de la fréquence d'horloge dépend du numéro atomique de l'élément utilisé dans l'horloge [6].

Par exemple, si $(d\alpha/dt)/\alpha = 1 \cdot 10^{-14}/\text{an}$, on devrait alors observer une dérive de $1.4 \cdot 10^{-14}/\text{an}$ de la différence des fréquences d'une horloge à césium et d'une horloge à ion mercure et une dérive de $0.45 \cdot 10^{-14}/\text{an}$ de la différence des fréquences d'une horloge à césium et d'une horloge à rubidium. Les mesures les plus précises à ce jour ont établi une borne supérieure à la dérive de la constante de structure fine : $(d\alpha/dt)/\alpha < 2-3 \cdot 10^{-14}/\text{an}$ [6]. Avec les performances en fréquence de PHARAO et des horloges sol au niveau de 10^{-16} , il sera possible de gagner au moins deux ordres de grandeurs sur la précision de ce test qui sera complémentaire des autres expériences visant à tester le principe d'équivalence (STEP, MICROSCOPE).

e) Test de la relativité restreinte : recherche d'une anisotropie éventuelle de la vitesse de la lumière

Il est possible de synchroniser deux horloges soit en utilisant le transport lent d'une troisième horloge, soit en utilisant un moyen de transfert de temps aller-retour de type "Two-way". Dans la théorie de la relativité restreinte, ces deux méthodes de synchronisation sont équivalentes dans tout référentiel galiléen. Certaines théories alternatives prédisent une violation de la relativité restreinte [7] et l'existence d'un référentiel privilégié. Les deux méthodes de synchronisation ne seraient équivalentes que dans ce référentiel. En d'autres termes, elles ne donneraient plus le même résultat dans tous les référentiels galiléens en translation uniforme par rapport à ce référentiel privilégié.

ACES permettra de tester cette prédiction de théories alternatives en recherchant une éventuelle anisotropie de la vitesse de la lumière, c'est-à-dire une variation δc de la vitesse de la lumière c en fonction de la direction d'observation. La mesure sera effectuée en mesurant l'évolution de la désynchronisation entre les horloges spatiales d'ACES et des horloges sol au cours de chaque passage de la station internationale.

Grâce à la très bonne stabilité court-terme des horloges et des liens T&F, il sera possible d'atteindre une sensibilité de 10^{-10} sur la mesure de $\delta c/c$, permettant ainsi de gagner en précision d'au moins un ordre de grandeur par rapport au meilleur test effectué à ce jour reposant sur les comparaisons d'horloges sol avec des satellites GPS [8].

CONCLUSION

La mission ACES, défi technologique et scientifique, apportera déjà des résultats scientifiques permettant de tester des théories qui sont des piliers de la science actuelle. Mais ACES sera aussi une expérience de préparation de missions futures encore plus ambitieuses. Par exemple, la démonstration du fonctionnement en microgravité de PHARAO sera essentielle pour le développement de nouveaux types d'instruments à atomes froids (capteurs inertiels ultra-sensibles reposant sur des techniques d'interférométrie atomique) utilisés dans des futures missions spatiales de physique fondamentale (HYPER). De même, la démonstration des performances du lien optique T2L2 permettra de préparer des missions d'horloges en orbite solaire (SORT) visant à tester encore plus finement la théorie de la relativité générale en effectuant une mesure plus précise de l'effet Shapiro.

REFERENCES

- [1] R.F.C. Vessot and M.W. Levine, *Journ.of General Relativity and Gravitation*, 10, 181 (1979) .
- [2] R.F.C. Vessot al., *Phys. Rev. Lett.* 45, 2081 (1980).
- [3] L. Blanchet et al., ACES relativity meeting, Paris February 1999 and to be published
- [4] N. Ashby, in *Proc. of the 1998 IEEE Frequency Control Symposium*, p. 320 (1998).
- [5] T. Damour and A. Polyakov, *Nucl. Phys. B*, 423, 532 (1994)
- [6] J. Prestage, R. Tjoelker and L. Maleki, *Phys. Rev. Lett.* 74, 3511 (1995)
- [7] Will C.M., *Theory and Experiment in Gravitational Physics revised edition*, (Cambridge University Press, Cambridge) 1993.
- [8] Wolf P., Petit G., *Physical Review A* 56, 4405 (1997).

La chronologie selon Newton

Michel LEFEBVRE

CNES, Bureau des longitudes

Disposer d'une « chronologie » universelle permettant de comparer des événements apparemment sans rapports entre eux n'était pas ressentie comme une nécessité. En Chine, par exemple, on remettait les compteurs à zéro au début du règne d'un nouvel empereur.

C'est au XVI^{ème} siècle qu'on prend conscience de l'intérêt d'une chronologie. Plusieurs personnalités s'y intéressent et vont proposer des solutions. Un des premiers à le faire est Mercator. Il propose "une Chronologie depuis commencement du monde jusqu'à l'année 1568 réalisée à partir d'éclipses et d'observations astronomiques". **Mercator** n'a pas achevé sa chronologie, mais il avait fait un travail énorme et essayé de relier les événements s'étant produits chez les Assyriens, les Perses, les Grecs et les Romains avec les éclipses de Lune et de Soleil.

C'est **Scaliger** (1540-1609) qui réalisa le premier système complet avec, en plus de l'astronomie, d'autres disciplines telles la philologie et la numismatique. C'est aussi l'époque où le Pape Grégoire XIII imposait le calendrier romain.

Le nom de JASON a été choisi pour désigner le satellite devant pérenniser les mesures de topographie dynamique effectuées depuis plus de 8 ans par le satellite Topex-Poseidon.

En faisant des recherches sur l'expédition des Argonautes, nous avons retrouvé ...I. **Newton**. Newton en effet avait, lui aussi, tenté d'établir une chronologie. Ses motivations reflètent son souci permanent et plus fort à la fin de sa vie :

« ...réconcilier les événements religieux relatés dans les Ecritures avec ceux enregistrés dans les chroniques d'Egypte, d'Assyrie, de Babylone, de la Perse et de la Grèce. Une chronologie commune lui paraît comme un moyen fort permettant d'unir les événements de la société civile et les événements religieux ».

Les données historiques qu'il utilise ne sont pas validées sérieusement et la façon de les utiliser est douteuse; les historiens ne manqueront pas de critiquer son analyse. Newton n'est pas un historien et "cela se voit". Bien entendu, il fallait respecter absolument la limite fixée par l'archevêque Ussher - origine à - 4004 ans. Est ce pour cela qu'il a écarté les données venant de Chine et dont il disposait ?

Mais c'est la partie astronomique qui est la plus intéressante et plus particulièrement **le choix de l'origine** et la manière **étonnante** et très **newtonienne** de **dater** cette origine.

Newton choisit comme origine l'expédition des **Argonautes** !!!

Il s'en explique : les récits historiques et notamment les travaux d'Hérodote décrivent la chute de Troie et la fondation de **Rome par Enée**, rescapé de la guerre de Troie. Or les héros de la guerre de Troie font remonter leur origine à un des passagers du navire '**Argo**'.

En travaillant par "génération", on a une assez bonne description moyenne et Enée permet donc de se rattacher à la chronologie gréco-romaine.

Controverses

Naturellement, le choix de l'origine paraît douteux. Les récits de l'expédition des Argonautes nous confortent dans l'idée qu'il s'agit d'un mythe plus que d'une réalité.

Newton répond que c'est **devenu** un mythe, mais le mythe est basé sur des faits réels.

L'accumulation des candidats supposés avoir participé à l'expédition choque notre esprit rationnel. Newton rétorque en montrant que ce mythe se retrouve dans plusieurs récits; cette convergence lui fait

penser que c'est à cause du fait qu'il est réel que tous veulent voir leur nom y figurer (nous dirions aujourd'hui : être associé à un succès ne gêne personne).

Parmi les argonautes, on trouve les deux navigateurs d'Argo et Orphée; le chanteur Musée, un des précepteurs d'Orphée, est aussi, selon la tradition, un promoteur de l'usage de sphères étoilées.

L'idée qu'Argo était le premier navire effectuant la première traversée était très forte et bien sûr, sur un prototype il faut tout essayer. Les deux astronomes de l'époque, Méton et Eumecton, remettent aux navigateurs une sphère céleste où sont reportées les constellations. C'est Chiron qui avait dessiné les constellations et placé les équinoxes et les solstices par rapport à ces constellations; on peut en déduire la position approchée du colure de printemps à l'époque des argonautes et la comparer avec celle de 1689; le décalage est dû à la précession et on obtient donc facilement la date de l'expédition par rapport à l'époque de Newton.

Toutefois Newton - par ailleurs admiratif du travail d'Hipparque- refait une analyse critique de la valeur de la précession donnée et il démontre que cette valeur est erronée. Hipparque n'a pas fait d'erreur importante dans le calcul des positions anciennes et des positions déduites de ses observations, mais l'erreur vient d'une mauvaise compréhension de la définition des années, se traduisant par une valeur erronée de l'intervalle de temps utilisé par Hipparque.

Newton va utiliser bien sûr, la valeur de la précession rectifiée. Il trouve alors la date de l'expédition; une analyse des erreurs possibles lui fait affirmer que l'erreur totale finale ne doit pas dépasser 30 ans.

Pour conforter cette valeur, il utilise comme tests d'autres observations indépendantes : nous retrouvons, par exemple, les observations faites par Thales du coucher matutinal des Pléiades 35 jours après l'équinoxe d'automne. Or, la position de la plus brillante étoile des Pléiades, Lucia, est repérée sur la sphère étoilée des anciens.

Autre recoupement avec des observations d'Arcturus par Hésiode. Cette étoile se levait au coucher du soleil 60 jours après le solstice d'hiver; ces deux tests donnent des valeurs très cohérentes avec celle déjà donnée.

Newton conclut de cette convergence non seulement que sa détermination est bonne, mais qu'elle ne peut être bonne qu'en considérant que l'expédition a bien eu lieu et a utilisé les connaissances de son époque.

Du reste, les constellations qui sont inscrites sur la sphère étoilée sont celles - et uniquement celles- visibles au dessus de l'horizon à cette époque.

Pour illustrer par un exemple, les figures 1 et 2, tirées de "L'Astronomie populaire" de Flammarion, montrent les constellations visibles à nos latitudes dans les deux configurations à 13000 ans d'intervalle. La figure 3 donne comme exemple typique le déplacement du point équinoxial à travers les constellations.

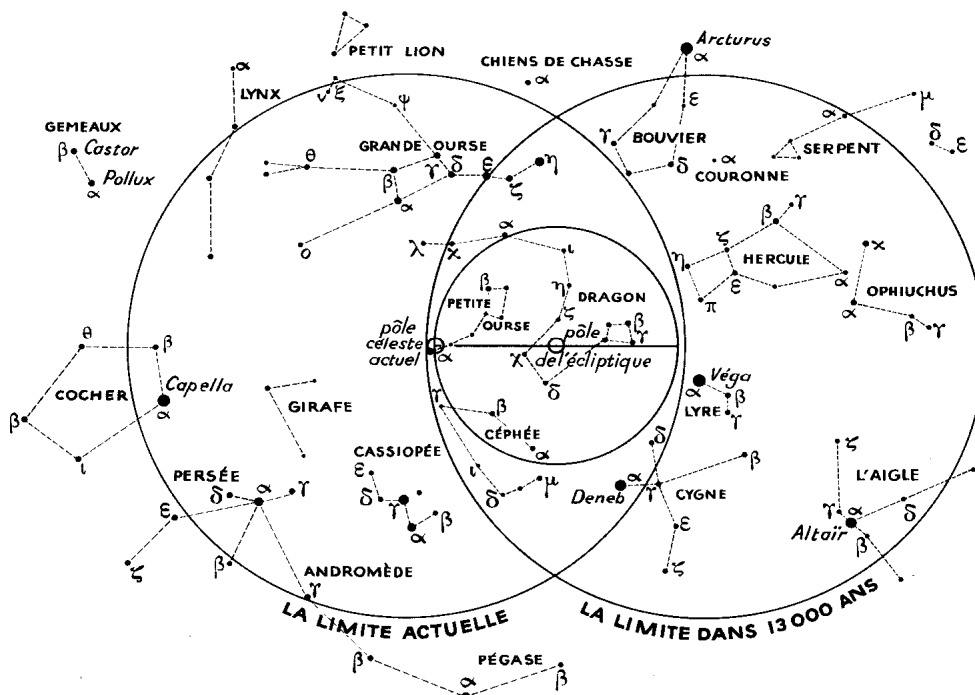


Figure 1 : Constellations boréales visibles à nos latitudes dans les deux configurations à 13000 ans d'intervalle (extrait de "L'Astronomie populaire" de Flammarion)

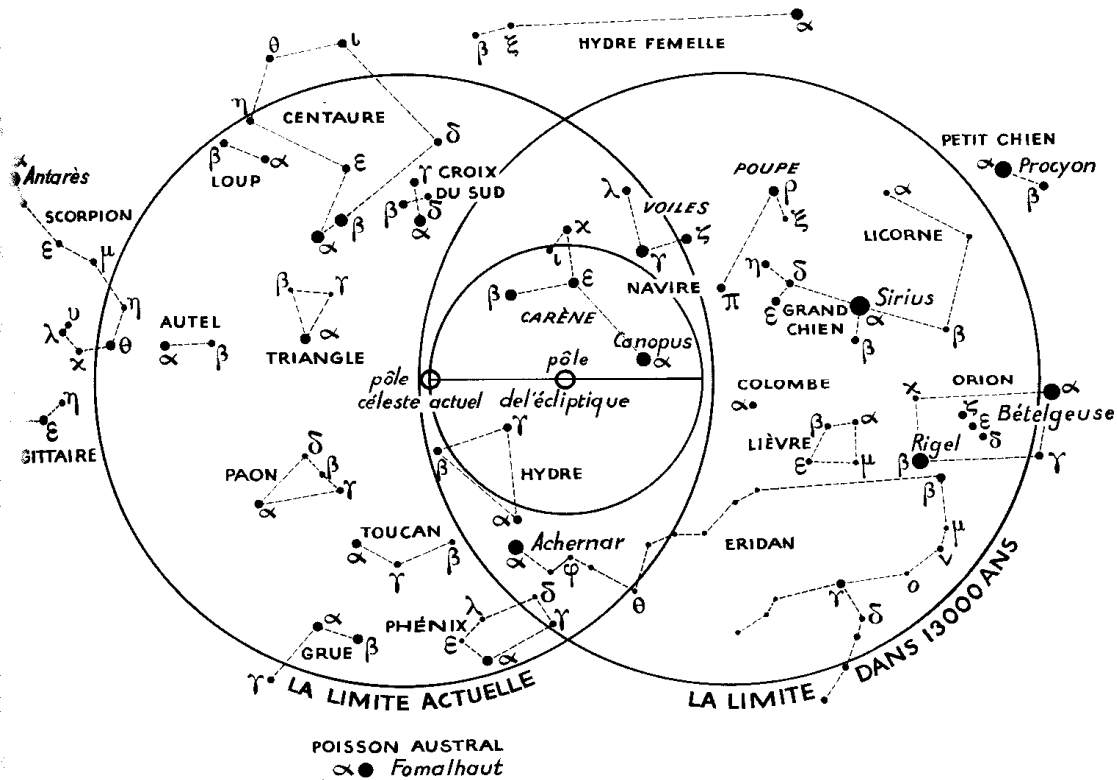


Figure 2 : Constellations australes visibles à nos latitudes dans les deux configurations à 13000 ans d'intervalle (extrait de "L'Astronomie populaire" de Flammarion)

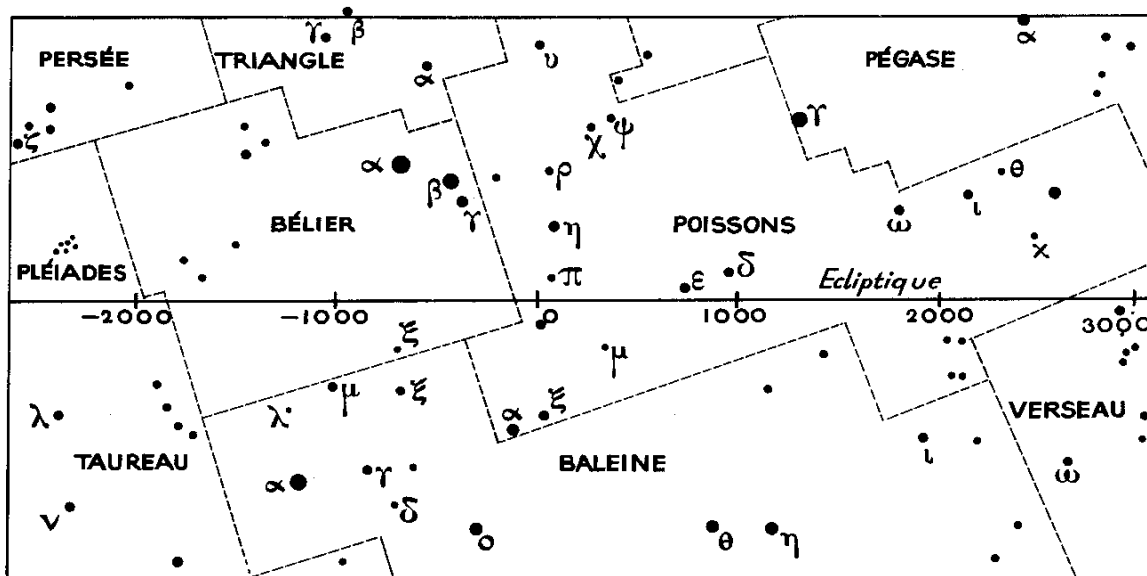


Figure 3 : Déplacement du point équinoxial à travers les constellations.

En guise de conclusion, on retrouve la "méthode Newton", somme d'intuitions souvent contestables, mais aussi d'éléments rigoureux. On y trouve aussi la confiance faite aux travaux précédents. Pouvoir tirer une nouvelle valeur de la précession en utilisant les récits anciens, et même indirectement une sphère qu'il n'a évidemment pu voir.

Il faudrait approfondir cette trop brève étude par des spécialistes de l'histoire des sciences. J'ai personnellement été attiré par le livre "les Découvreurs", mais les détails sur le travail de Newton se trouvent dans des documents plus anciens et, par exemple, dans "Abrégé de la Chronologie des anciens royaumes"- traduit de l'anglais par Mr Reid et publié à Genève chez Henri-Albert Gosse en 1763.

Le récit de l'expédition des argonautes se lit avec plaisir dans l'**Argonautica** écrit par Apollonius de Rhodes - Edition Penguin

La chronologie de Newton a été contestée par ses contemporains, mais c'était probablement la plus complète. C'est à cette époque qu'on a commencé à baptiser cette chronologie "**Latitude des temps**", sans conteste un élément important de la mondialisation.

Terminons par une anecdote : Apollo 8 quitte la Terre pour aller contourner la Lune : un contrôleur au sol n'entendant plus les astronautes s'inquiète : "Qui est aux commandes ?" Réponse du commandant de bord, Frank Borman : "Isaac Newton". Il aurait probablement aimé.

Conférenciers de la Journée scientifique 2000 du Bureau des longitudes

(statut à la date de la Journée 2000)

Patrick Rocher, astronome à l'IMCCE, est en charge, depuis de longues années, de la rédaction du chapitre "calendriers" de l'Annuaire du Bureau des longitudes.

Vincent Deparis est chercheur dans le domaine de l'histoire des sciences de la Terre au laboratoire de Géophysique interne et tectonophysique de Grenoble.

Philippe Laurent, chercheur au CNRS, à l'Observatoire de Paris/DANOF, au Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences est responsable scientifique du programme PHARAO d'horloges à atomes refroidis .

Bernard Guinot, astronome associé à l'Observatoire de Paris, membre du Bureau de longitudes, est ancien Directeur du Bureau International de l'Heure, et est à l'origine de la création du Temps Atomique International.

Noël Dimarcq, chercheur au CNRS, au Laboratoire de l'Horloge Atomique, est responsable des programmes scientifiques de la mission spatiale ACES d'horloges embarquées dans l'espace.

Michel Lefebvre, du Centre National d'Etudes Spatiales, est membre correspondant du Bureau des longitudes.

BUREAU DES LONGITUDES

Journée scientifique

Temps et Calendriers

(calendriers, chronologies, mesure du temps)

Présentation de N. Capitaine

(Président du Bureau des longitudes)

Aspects historiques des calendriers

par Patrick ROCHER, IMCCE, Observatoire de Paris

Les chronologies en Sciences de la Terre

par Vincent DEPARIS, LGIT, Observatoire de Grenoble

Performances actuelles des horloges atomiques

par Philippe LAURENT, BNM-LPTF, Observatoire de Paris

Le Temps atomique international

par Bernard GUINOT, Observatoire de Paris et Bureau des longitudes

Programme ACES d'horloges dans l'espace et applications à la physique fondamentale

par Noël DIMARCO, Laboratoire de l'Horloge Atomique

Newton et la chronologie

par Michel LEFEBVRE, CNES et Bureau des longitudes

Mardi 20 juin 2000, salle Hugot, à 14 h

Palais de l'Institut

23, quai de Conti - 75006 PARIS

La journée se terminera par un cocktail

(R. S. V. P. au 01 43 26 59 02 ou Télécopie : 01 43 26 80 90 ou Mél : Bureau.Des.Longitudes@wanadoo.fr)