

La mesure du Temps au XXI^e siècle

Christophe SALOMON
 Laboratoire Kastler Brossel
 Ecole Normale Supérieure
 CNRS et UPMC
 24, rue Lhomond
 75231 Paris, France

Un peu d'histoire : la quête de la précision

Depuis l'antiquité, les hommes ont toujours cherché à mesurer le temps ou, plus précisément, les intervalles de temps. Ils se sont d'abord tournés vers les phénomènes naturels qui présentent une grande régularité comme la rotation de la terre autour du soleil, la rotation de la lune autour de la terre ou encore la rotation de la Terre sur elle-même pour définir des calendriers et des échelles de temps. Ils ont ensuite cherché à réaliser eux-mêmes des instruments toujours plus précis et l'un des plus anciens instruments connus est le sablier égyptien. Cependant, il faudra attendre le début des années 1600 et la découverte du pendule par Galilée et sa mise en pratique par Huygens, pour que ces instruments commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour (Figure 1).

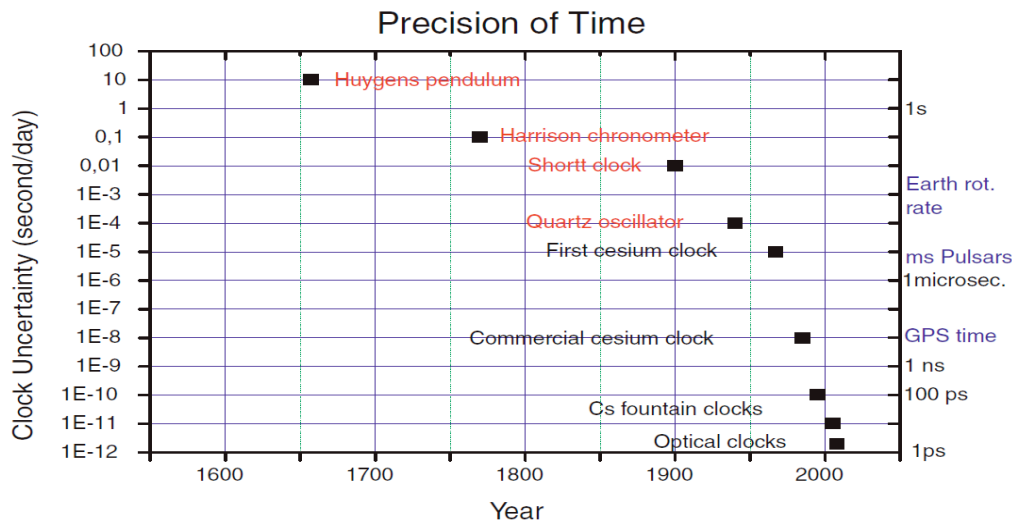


FIGURE 1 – L'évolution de la précision de la mesure du temps sur les quatre derniers siècles. Avant 1950 les horloges utilisaient des systèmes mécaniques comme le pendule ou les montres à échappement. Depuis le milieu du 20^{ème} siècle, les horloges les plus précises sont des horloges atomiques. Les horloges les plus récentes présentent une erreur qui n'excède pas une seconde tous les 3 milliards d'années, ou 5 secondes sur l'âge de l'univers.

Les petites oscillations du pendule sont indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement régulières, c'est-à-dire périodiques (Figure 2). La période du pendule ne dépend que d'un petit nombre de paramètres, la longueur du fil l et l'accélération de la pesanteur g : $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$. Cette formule simple montre également les limites du dispositif : si la longueur du fil change, à cause de la température par exemple, l'horloge perdra sa précision ; de même si l'accélération de la pesanteur change (par exemple en prenant de l'altitude). Poussés par les enjeux de la navigation marine transocéanique et la détermination de la longitude, mais aussi par les prix en espèces sonnantes et trébuchantes promis par les souverains des deux siècles suivants, les pendules, montres mécaniques et chronomètres ont subi des raffinements de plus en plus avancés. Combattant l'influence néfaste des changements de température et d'humidité sur le fonctionnement de ses chronomètres, Harrison finit par produire en 1759, après quarante années d'efforts, un instrument qui présentait une erreur inférieure à un dixième de seconde par jour. Son chronomètre fut testé en mer par un navire britannique qui fit l'aller et retour Portsmouth - les Antilles en un peu moins de 3 mois. Au retour, le chronomètre embarqué avait moins de 5 secondes d'écart avec ceux restés au sol. Il reçut pour cet exploit un prix de 40 000 livres, une somme considérable pour l'époque !



FIGURE 2 – Le pendule de Galilée/Huygens. Les petites oscillations du pendule sont indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement périodiques. En comptant le nombre d'oscillations du pendule, on mesure un intervalle de temps, réalisant ainsi une horloge. Plus la période du pendule est courte, plus élevé sera le nombre d'oscillations dans un intervalle de temps donné et plus précise sera la mesure de cet intervalle. Enfin, une formule simple relie la période des oscillations à la longueur du fil et à l'accélération de la gravité indiquant aussi les limites d'un tel dispositif, les variations de température et les variations de l'accélération de la pesanteur.

La percée scientifique suivante fut l'invention de l'oscillateur à quartz en 1918. Le système périodique n'est plus un système mécanique mais un champ électromagnétique oscillant reposant sur les propriétés piezoélectriques du quartz.

La vibration mécanique du cristal de quartz produit un champ électrique oscillant à une fréquence bien définie et bien plus élevée que celle du pendule (quelques millions d'oscillations par seconde). Ce champ est amplifié électroniquement jusqu'à atteindre le seuil d'oscillation, ce qui se produit lorsque le gain de l'amplificateur excède les pertes du système. Les montres et oscillateurs à quartz ont envahi notre monde moderne et constituent une base de temps suffisamment stable pour la plupart des applications courantes.

Cependant, comme le pendule, mais à un degré bien moindre, l'oscillateur à quartz présente des dérives en température. Pour domestiquer ces oscillateurs, les physiciens ont eu l'idée de réaliser une horloge atomique qui combine les propriétés de l'oscillateur à quartz et celles de l'atome. Dans un atome, l'énergie d'excitation ne peut prendre que des valeurs discrètes ; on dit que les niveaux d'énergie sont quantifiés ; ils sont régis par les lois de la mécanique quantique qui gouverne le comportement des objets microscopiques. Les niveaux d'énergie ne dépendent pas de la température (ou plus exactement très, très peu !). Les atomes sont universels : un atome de césium à Paris présentera exactement les mêmes propriétés qu'un atome de césium à New-York ou Tokyo. Ce n'est pas le cas des pendules ou des oscillateurs à quartz qui sont extrêmement difficiles à réaliser à l'identique. La première horloge à césium réalisée en Angleterre par Essen et Parry en 1955 fonctionnait sur le principe décrit sur la figure 3 et son erreur journalière n'était que de 0,00001 seconde bien plus faible que l'erreur d'un quartz ou des meilleurs systèmes mécaniques.

La 13^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures de 1967 choisit ainsi l'atome de césium pour donner la définition actuelle de la seconde du système international d'unités : "La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état électronique fondamental du césium 133". Depuis cette époque, plusieurs milliers d'horloges à césium commerciales ont été produites pour de nombreuses applications dont le fameux système de navigation par satellite GPS. Au début des années 1990, les atomes refroidis par laser ont permis d'augmenter la précision des horloges à césium par encore deux ordres de grandeur. En effet, à une température de un millionième de degré au dessus du zéro absolu les atomes de césium ont une vitesse d'agitation de seulement 7 millimètres par seconde. Ils peuvent être utilisés en fontaine atomique de façon à obtenir un temps d'interaction avec l'onde électromagnétique excitatrice approchant 1 seconde (Figure 4). Cette durée est cent à mille fois plus longue que dans l'horloge à jet atomique de Essen et Parry. Les fontaines atomiques du LNE-SYRTE présentent une erreur de 10 picosecondes par jour et, avec d'autres horloges disséminées dans le monde, contribuent à la réalisation du temps Atomique International (TAI) qui est le temps de référence au niveau mondial. Aujourd'hui, une vingtaine de fontaines atomiques sont en fonctionnement dans le monde et sont régulièrement comparées entre elles pour réaliser le TAI.

Ces deux dernières années, de nouveaux développements sur les horloges atomiques ont permis d'approcher la picoseconde d'erreur par jour, soit moins d'une seconde tout les 3 milliards d'années ou encore 5 secondes sur l'âge de l'univers ! Ces nouvelles horloges sont des horloges optiques : au lieu d'utiliser un champ électromagnétique de période 10^{10} Hertz comme l'horloge à césium, (le pendule bat à 10 milliards de périodes par seconde !) elles utilisent un champ lumineux qui oscille encore plus vite : 10^{15} Hz, soit 100 000 fois plus vite. Ce champ lumineux est produit par un laser et ce laser est asservi sur une transition atomique qui se trouve

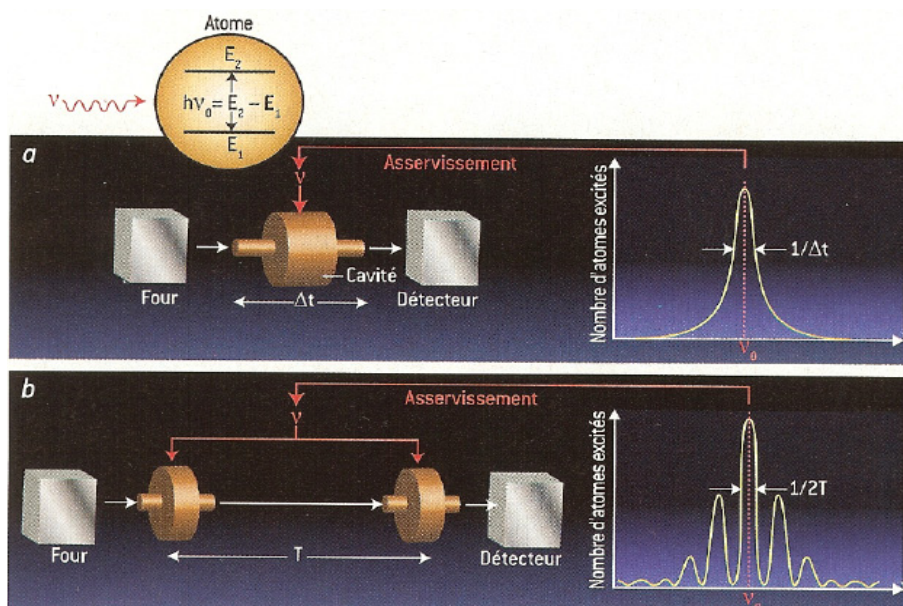


FIGURE 3 – Principe d’une horloge atomique. Une radiation électromagnétique de fréquence ν éclaire un ensemble d’atomes à deux niveaux d’énergie E_1 (fondamental) et E_2 (excité). La séparation en énergie est $h\nu_0$ ou h est la constante de Planck. Les atomes de césium issus d’un four forment un jet atomique qui traverse une cavité où la radiation est appliquée. Le détecteur D compte le nombre d’atomes portés dans l’état excité quand la radiation de fréquence ν est proche de la fréquence atomique ν_0 . Lorsqu’on balaye la fréquence de la radiation autour de ν_0 , le nombre d’atomes excités fournit une courbe en cloche, une courbe de résonance centrée en ν_0 dont la largeur est inversement proportionnelle au temps d’interaction Δt entre la radiation et les atomes. La méthode proposée par N. Ramsey utilise deux zones séparées dans l’espace. Les atomes subissent deux interactions successives séparées dans le temps par une quantité T . Il en résulte un phénomène d’interférence produisant des franges de largeur $1/2T$. Plus les atomes sont lents, plus les franges seront étroites et meilleure sera l’horloge.

dans le spectre visible ou proche ultra-violet. L’analogie avec le pendule décrit plus haut indique que la période d’oscillation est ici beaucoup plus courte : il est donc plus facile de déceler un infime écart de temps en comptant un nombre entier de périodes. Mais comment compter ces oscillations si rapides ? aucun photodétecteur n’est capable de répondre à un champ oscillant si rapidement. C’est ici que la contribution des prix Nobel de physique 2005, Jan Hall et Theodore Haensch est cruciale. Ces deux chercheurs et leurs équipes ont mis au point un “diviseur” de fréquences optiques très efficace et simple à mettre en oeuvre. Avec ce diviseur, il est maintenant facile de raccorder les fréquences rapides du domaine optique au domaine radio ou les signaux oscillants sont plus lents : ils peuvent être transmis simplement sur des câbles et les périodes d’oscillation comptées par des méthodes électroniques standard. Le diviseur peut aussi être utilisé en sens inverse, comme multiplicateur et réaliser, à partir des basses fréquences, des références de fréquences précises dans le domaine visible du spectre.

Comme le montre le graphe de la figure 1, l’amélioration des performances des horloges est spectaculaire : en un peu plus de 4 siècles, les meilleures horloges atomiques ont gagné 13 ordres de grandeurs par rapport au pendule de Huygens !

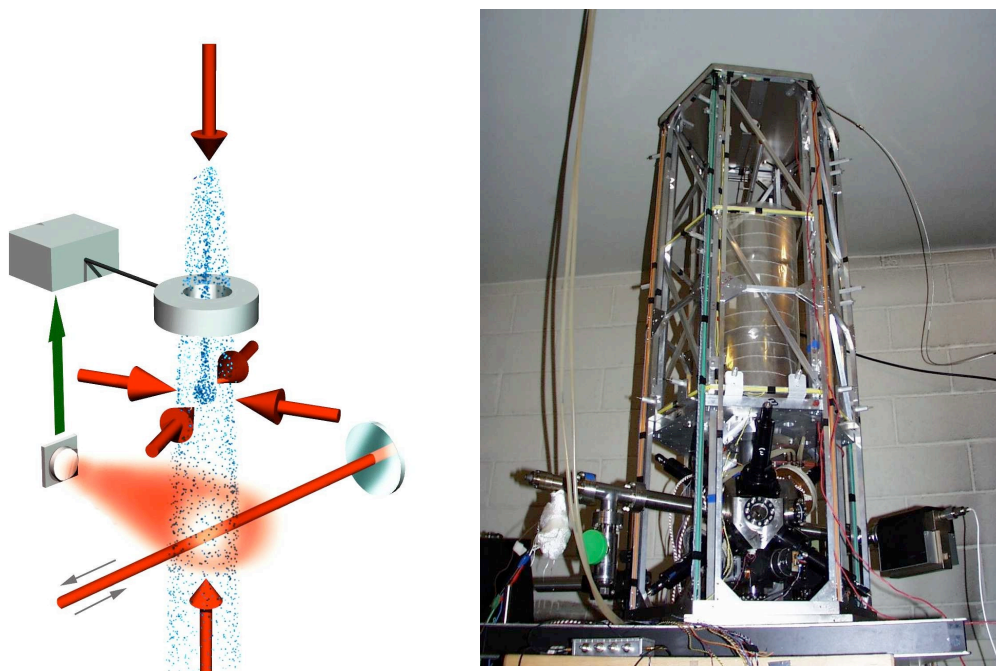


FIGURE 4 – (a) Une fontaine atomique. Les atomes de césium sont refroidis par laser à une température de 1 microKelvin et lancés vers le haut avec une vitesse de 4m/s. Ils traversent à la montée et à la descente la cavité micro-onde qui contient le champ excitateur de fréquence ν . Le temps entre les deux interactions atomes-champ atteint 0,5 seconde et est environ 100 fois plus long que dans une horloge à jet thermique illustrée sur la figure 3. (b) Une fontaine à atomes froids du LNE-SYRTE de l’observatoire de Paris.

Sur les 50 dernières années le gain est d’un facteur 10 tous les 10 ans ! Nul ne sait si cette progression se maintiendra à un tel rythme dans l’avenir !

Les horloges à atomes froids et l’horloge spatiale PHARAO

Revenons au principe des fontaines atomiques illustré sur la figure 4. Comme nous l’avons dit plus haut, la fontaine atomique utilise la gravité pour allonger le temps d’interaction entre le champ oscillant excitateur et les atomes. Dans la méthode inventée en 1952 par le prix Nobel N. Ramsey, il n’est pas nécessaire que ce champ oscillant éclaire en permanence les atomes. Deux interactions successives suffisent et la courbe de résonance possède une largeur donnée par l’inverse du temps entre ces deux interactions et non pas le temps passé par les atomes à l’intérieur de la cavité. Pour allonger ce temps, il est donc tentant de lancer les atomes de la fontaine le plus haut possible et une expérience à l’université de Stanford explore cette direction avec une fontaine de 10 mètres de haut. De telles dimensions apportent de nouvelles contraintes et le gain en précision attendu n’évolue que comme la racine de la hauteur ; il sera d’un facteur 3 par rapport aux fontaines en fonctionnement. Une solution plus radicale est de s’affranchir de l’accélération de la pesanteur. C’est le projet spatial PHARAO (Projet d’Horloge Atomique par Refroidissement d’Atomes en Orbite) conduit par le CNES, le LNE-SYRTE à l’observatoire de Paris et le LKB

à l'École Normale Supérieure.

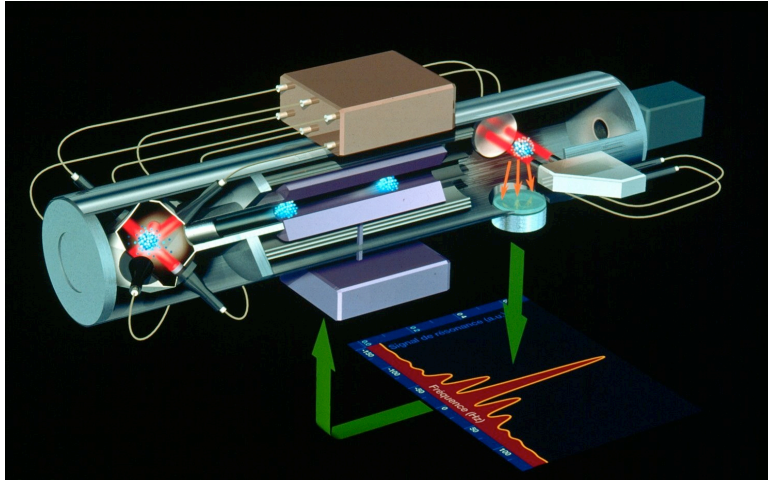


FIGURE 5 – Principe de l'horloge à atomes froids PHARAO en microgravité. Les atomes de césium sont collectés dans une mélasse optique et refroidis par laser dans une première chambre à vide (à gauche). Ils sont ensuite envoyés lentement dans la cavité micro-onde où ils subissent les deux interactions successives avec le champ accordé à la fréquence de l'atome de césium $\nu_0=9\ 192\ 631\ 770$ Hz. Les atomes excités sont ensuite détectés par fluorescence induite par laser. Pour une vitesse de lancement de 10 cm/s la largeur de la résonance attendue en microgravité est 0.2 Hz, cinq fois plus fine que dans une fontaine atomique en présence de gravité.

Le principe de l'horloge en microgravité PHARAO est illustré sur la figure 5. L'on revient en quelque sorte au schéma de l'horloge de Essen et Parry mais les atomes du jet atomique sont maintenant remplacés par un jet ultra-lent d'atomes refroidis par laser. L'absence de gravité qui règne à bord d'un satellite permet aux atomes d'évoluer à vitesse constante et les deux zones d'interaction sont séparées spatialement. Dans un dispositif compact (figure 6 a et b), on espère produire une résonance atomique 5 à 10 fois plus fine que dans une fontaine atomique, soit près de dix mille fois plus fine que dans une horloge commerciale !

L'horloge PHARAO sera un élément central de la mission spatiale européenne ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) de l'agence spatiale européenne ESA. La charge utile ACES (Figure 8) sera installée en 2013 à bord de la station spatiale internationale (ISS) qui orbite autour de la terre à une altitude moyenne de 400 kms. Par temps clair, il est très facile de voir l'ISS à l'oeil nu une heure environ après le coucher du soleil. Eclairée par le soleil, elle apparaît à l'observateur comme une étoile très brillante qui parcourt la voûte céleste en environ 5 minutes ! sa période orbitale est d'environ une heure et demie, soit 5400 secondes. Outre l'horloge PHARAO, la mission spatiale ACES comporte un maser à hydrogène développé par la Suisse, un système de comparaison de temps sol-bord ultra-précis développé par l'Allemagne, un transfert de temps par laser, un récepteur GPS/GALILEO et des équipements de support. L'ensemble pèse 220 kg et consomme 450 watts.

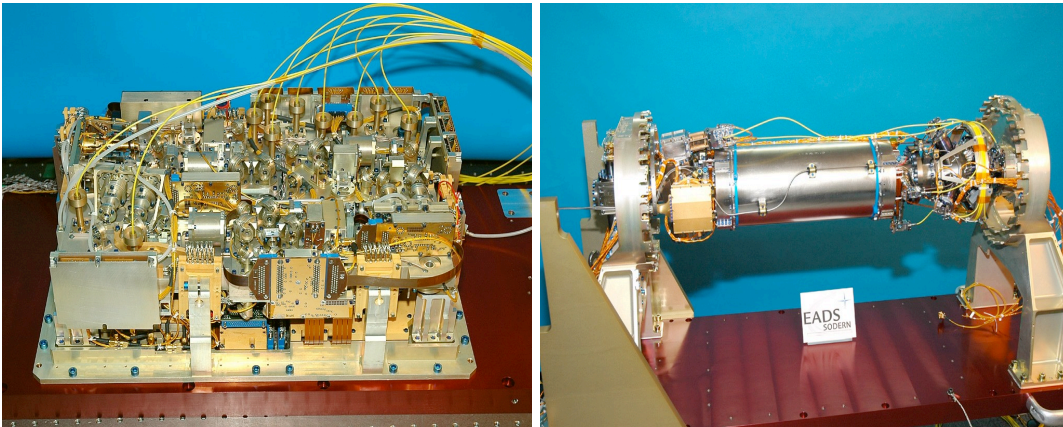


FIGURE 6 – (a) Le banc optique de l'horloge PHARAO. Il comporte huit lasers à diode stabilisés en température, en fréquence et en intensité. Les faisceaux sont dirigés vers la chambre à vide à l'aide de fibres optiques (en jaune). Il occupe un volume de 30 litres et pèse 20 kg. Réalisation société EADS-SODERN. (b) Le tube à vide de l'horloge PHARAO où a lieu l'interaction entre les atomes froids et le champ excitateur micro-onde. Sa longueur est de 900 mm et son poids de 45 kg. Réalisation de la société EADS/SODERN.



FIGURE 7 – La mission spatiale ACES de l'agence spatiale européenne. L'horloge PHARAO et un maser à hydrogène seront mis en orbite à bord de la station spatiale internationale en 2013. Des comparaisons de temps ultra-précises avec un réseau d'horloges au sol permettront d'effectuer des tests de physique fondamentale et relativité. Un récepteur GPS/GALILEO permettra également des applications en sciences de la terre et en navigation.

Les tests de physique fondamentale

Les objectifs scientifiques d'une telle mission comportent plusieurs volets : tout d'abord l'horloge PHARAO en microgravité et le maser à hydrogène réaliseront

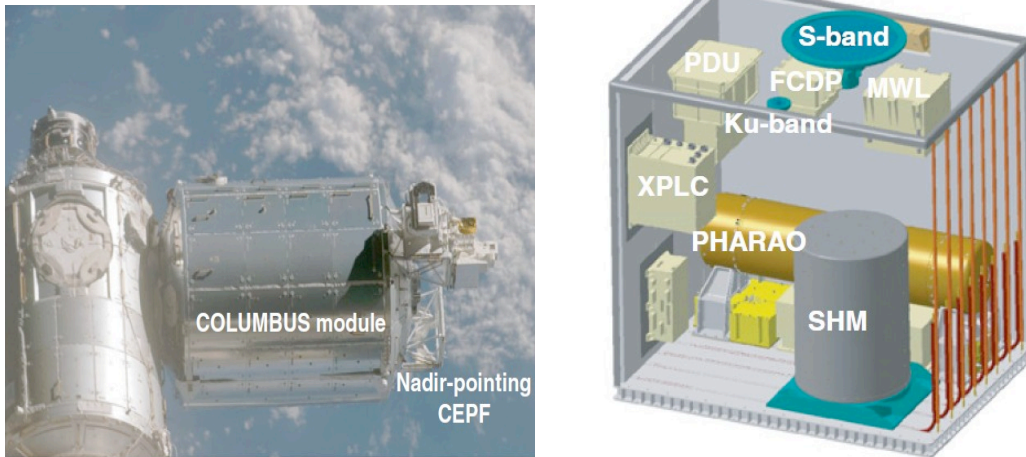


FIGURE 8 – A gauche le module européen Columbus de la station spatiale internationale et la plateforme orientée vers la terre où seront installés les équipements de la mission ACES. A droite, vue d'ensemble de la palette ACES comportant l'horloge PHARAO, le maser SHM, un transfert de temps ultra-précis fonctionnant dans le domaine micro-onde (MWL), un transfert de temps par laser et des équipements de support.

dans l'espace une échelle de temps de très haute stabilité. Cette échelle de temps sera comparée à celle fournie par un réseau d'horloges au sol. Il sera alors possible de mesurer avec une grande précision l'effet Einstein, le décalage gravitationnel des horloges : la fréquence de l'horloge PHARAO, mesurée par le réseau d'horloges au sol apparaîtra plus élevée par une quantité gH/c^2 , où g est l'accélération de la pesanteur, H l'altitude de l'ISS est c la vitesse de la lumière. Avec l'altitude de 400 kms, on attend un décalage de fréquence de $+ 4.5 \cdot 10^{-11}$ en valeur relative. Avec des horloges stables et exactes à 10^{-16} , l'effet Einstein pourra être testé au niveau de $2 \cdot 10^{-6}$, une amélioration par un facteur 70 par rapport à la précédente expérience spatiale Gravity Probe A de la NASA en 1976.

En second lieu, grâce à cette échelle de temps spatiale, il sera possible de comparer entre elles les diverses horloges au sol qui participeront à la mission. Celles-ci fonctionnent souvent sur des principes physiques différents, utilisent des atomes différents ou encore des transitions atomiques différentes. Cela permettra alors de tester la conjecture du grand physicien P. Dirac : est-ce que les constantes fondamentales de la physique sont invariables dans le temps ? L'objectif de la mission ACES est ici de réaliser un tel test au niveau global avec une sensibilité de $10^{-17}/\text{an}$. Par exemple, la constante de structure fine α qui caractérise l'interaction électromagnétique et qui est responsable de la stabilité des atomes et des molécules a-t-elle évolué depuis les premiers âges de l'univers ? Ou encore le rapport des masses des constituants fondamentaux de la matière que sont les protons et les électrons est-il en train de changer avec l'âge de l'univers ? Cette recherche est extrêmement active aujourd'hui au niveau mondial car son enjeu est considérable. Si l'on trouve en effet une variation pour l'une de ces quantités, ce sera le signe que le principe d'équivalence, l'un des fondements, depuis Einstein, de notre description actuelle de la physique, est violé. Cela indiquerait que de nouvelles interactions ou nouvelles forces sont en jeu, qu'il faudra découvrir et étudier ! Il est utile de rappeler ici que

les astrophysiciens nous indiquent que près de 95 % de la masse de l'univers visible aujourd'hui est constituée de matière noire ou d'énergie noire d'origine inconnue !

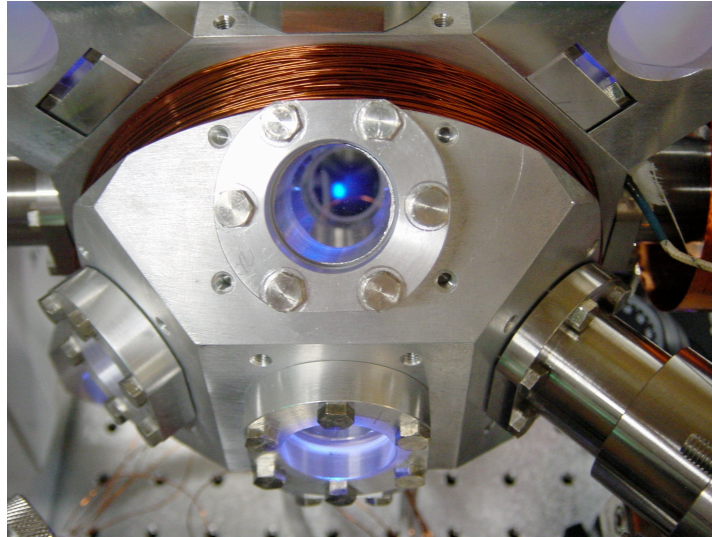


FIGURE 9 – Une horloge optique à atomes de strontium refroidis par laser, en cours de développement par l'équipe de Pierre Lemonde au laboratoire LNE-SYRTE de l'observatoire de Paris. La fluorescence bleue des atomes de strontium est visible au centre de l'enceinte à vide. Ce type d'horloge est l'un des plus prometteurs pour atteindre une stabilité de fréquence dans la gamme des 10^{-18} – 10^{-19} .

Quelques applications

Enfin, outre ces objectifs de test des lois fondamentales de la physique et une amélioration prévisible du Temps Atomique International par ces comparaisons entre horloges au niveau global, la mission ACES comporte également des objectifs scientifiques appliqués : le premier a trait à la géodésie. En effet, ayant testé la validité du décalage gravitationnel des horloges, on pourra ensuite utiliser l'effet Einstein pour réaliser une nouvelle sorte de géodésie : l'effet Einstein sera utilisé pour déterminer la différence des potentiels gravitationnels entre deux horloges distantes. Supposons que ces deux horloges soient identiques, au repos, et leur fréquences comparées à distance par la mission ACES ou, pour des distances plus faibles, par fibre optique télécom. Leur écart de fréquence sera directement imputable à leur différence de potentiel gravitationnel. Cette nouvelle méthode de géodésie pourra être comparée aux méthodes existantes pour la détermination du géoïde terrestre qui reposent principalement sur des missions spatiales ou des méthodes de nivellement terrestres. ACES vise à démontrer ce nouveau type de géodésie relativiste avec une sensibilité en distance verticale au niveau de 10 centimètres. Dans une publication récente, l'équipe de D. Wineland au NIST Boulder a mis en évidence cet effet en comparant deux horloges optiques dont l'une était soulevée verticalement d'une trentaine de centimètres ! Si l'on extrapole les performances des horloges actuelles à l'échelle de 10 ans comme indiqué sur la figure 1, les horloges optiques devraient atteindre une stabilité de fréquence de 10^{-18} soit l'équivalent de 1 cm de décalage gravitationnel. A

ce niveau, le potentiel terrestre n'est plus du tout stable ; suivant l'état des marées océaniques, la pression atmosphérique, les vents et le niveau de l'eau dans les nappes phréatiques, le potentiel terrestre varie ! Les horloges deviennent ainsi un nouveau type de senseur géodésique ; mais inversement l'on peut craindre que ces fluctuations du potentiel terrestre ne viennent limiter la qualité de la mesure du temps et de ses applications !

Une solution possible à ce problème sera alors de mettre dans l'espace une ou plusieurs horloges ultrastables de façon à s'affranchir de ces fluctuations. En effet leur influence décroît très vite lorsque l'on s'éloigne de la surface de la terre.

Une seconde classe d'applications repose sur l'utilisation du récepteur GPS/GALILEO qui sera placé sur la plateforme ACES pour l'étude de l'atmosphère terrestre. Les signaux émis par les satellites GPS lorsqu'ils apparaissent ou disparaissent au dessus de l'horizon vu par IISS sont perturbés par la vapeur d'eau de l'atmosphère présente sur le trajet satellite GPS-ISS. De même les signaux sont affectés par les différences de température en fonction de l'altitude. Les spécialistes de météorologie utilisent ces signaux pour reconstituer une carte des zones nuageuses et les profils de température de l'atmosphère. Une direction de recherche actuelle concerne également la réflexion des signaux GPS sur la surface de la mer qui donne accès à la hauteur des vagues et à leur direction.

Le futur

La mission spatiale ACES aborde la dernière phase de réalisation avant son lancement vers l'ISS. Les modèles d'ingénierie des instruments ont été réalisés et testés au cours des années 2008-2010. L'horloge PHARAO et les autres instruments de vol sont en cours de fabrication dans l'industrie. Ils seront assemblés et testés au centre spatial du CNES à Toulouse avant d'être acheminés vers Friedrichshafen en Allemagne où l'intégration globale sur la plate-forme ACES sera réalisée. Le lancement dans l'espace sera réalisé par une fusée japonaise dans la seconde moitié de 2013 pour une durée de mission de 18 mois à 3 ans. Les équipes d'ingénieurs et de scientifiques préparent maintenant les opérations en vol, l'acquisition des données et leur exploitation.

Si l'on revient à l'amélioration exponentielle des performances des horloges qu'indique la figure 1, jusqu'où les horloges atomiques pourront elles progresser avant qu'une nouvelle technologie ne viennent les surpasser ? De façon plus prosaïque, après 45 ans de bons et loyaux services, la précision de la définition actuelle de la seconde fondée sur l'atome de césium est maintenant dépassée par un facteur 20 par les horloges optiques. Il va donc falloir changer la définition de la seconde du SI ; les atomes candidats sont nombreux (Figure 9) et les travaux en laboratoire explorent plusieurs pistes pour atteindre des stabilités de fréquence de 10^{-18} - 10^{-19} !

Gageons que de nouvelles applications scientifiques et de nouvelles idées pour mesurer le temps de façon de plus en plus précise verront le jour dans les prochaines années !

Références

- [1] Cacciapuoti L. et Salomon Ch. : Space clocks and fundamental tests : the ACES experiments, *European Physical Journal (Special topics)* **172**, 57–68 (2009).

- [2] Schiller S. et al. : Optical clocks in space. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **166**, 300–302 (2007).
- [3] Tino G. M. et al. : Atom interferometers and atomic clocks : new quantum sensors for fundamental physics experiments in space. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **166**, 159–165 (2007).

Le site Internet du projet PHARAO : <http://smc.cnes.fr/PHARAO/Fr/>