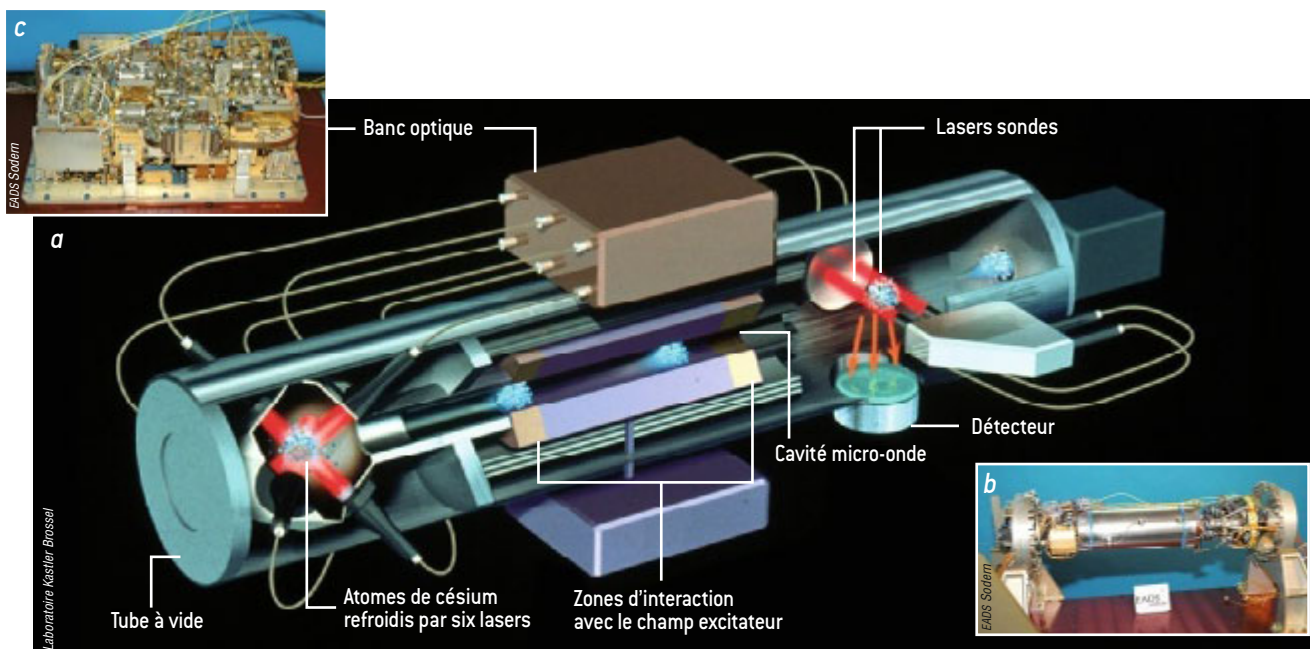




4. PRINCIPE de l'horloge à atomes froids PHARAO en microgravité [a]. Les atomes de césium sont refroidis par laser dans une chambre à vide (à gauche), puis envoyés lentement dans une cavité micro-onde où ils subissent deux interactions successives avec le champ excitateur produit par un maser à hydrogène et accordé sur la fréquence de l'atome de césium. Les atomes excités sont ensuite détectés par fluorescence provoquée par laser (à droite). Comme dans la fontaine atomique, le champ excitateur est asservi sur la fréquence de l'atome de césium grâce à un montage électro-

nique qui transmet au maser la fréquence mesurée par la fluorescence. Pour une vitesse de lancement de dix centimètres par seconde, la largeur de la résonance attendue en microgravité est 0,2 hertz, soit cinq fois plus étroite que dans une fontaine atomique en présence de gravité. Le tube à vide qui contient l'ensemble mesure 90 centimètres de long et pèse 45 kilogrammes [b]. Le banc optique, qui produit et stabilise les lasers du montage, occupe un volume de 30 litres et pèse 20 kilogrammes [c]. Les faisceaux sont acheminés jusqu'au tube par fibres optiques.

est facilement mesurable, car il appartient au domaine des ondes radio, et chaque dent du peigne possède une fréquence qui est un multiple entier de cet espacement.

Asservi, comme le champ lumineux excitateur, sur la transition atomique, le laser femtoseconde sert de règle graduée : en combinant le champ lumineux excitateur et le peigne de fréquence, il est possible de déterminer la dent du peigne la plus proche de la fréquence du champ excitateur, ce qui permet de relier les fréquences rapides du domaine optique au domaine radio où les signaux oscillants sont plus lents. Ces signaux peuvent alors être transmis simplement par des câbles, et les périodes d'oscillation comptées par des méthodes électroniques usuelles. 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.

L'amélioration des performances des horloges est spectaculaire : en un peu plus de quatre siècles, les meilleures horloges atomiques ont gagné 13 ordres de grandeur par rapport au pendule de Huygens et, sur les 50 dernières années, le gain est d'un facteur 10 tous les dix ans.

Revenons au principe des fontaines atomiques. Nous l'avons vu, dans la

méthode inventée par N. Ramsey, il n'est pas nécessaire que le champ oscillant éclaire en permanence les atomes. Deux interactions successives suffisent et c'est l'intervalle de temps entre ces interactions qui donne la précision de l'horloge : plus l'intervalle de temps est grand, plus l'horloge est précise. Pour allonger ce temps, il est donc tentant de lancer les atomes de la fontaine le plus haut possible : une expérience à l'Université Stanford explore cette direction avec une fontaine de dix mètres de haut. De telles dimensions apportent cependant de nouvelles contraintes, et le gain en précision attendu n'évolue que comme la racine carrée de la hauteur ; dans cette expérience, il sera d'un facteur trois par rapport aux fontaines en fonctionnement.

S'affranchir de la pesanteur...

Une solution plus radicale est de s'affranchir de l'accélération de la pesanteur. Dans une fontaine atomique, pour contrer la gravité et projeter suffisamment haut les atomes, il faut leur donner une vitesse assez grande, de l'ordre de quatre mètres par seconde ; en impesanteur, en revanche, il est possible d'envoyer la boule d'atomes refroidis à une vitesse 40 fois inférieure

– de l'ordre de dix centimètres par seconde –, ce qui permet d'augmenter considérablement le délai entre les deux interactions avec le champ oscillant. C'est le projet spatial PHARAO (Projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite) conduit par le CNES et des laboratoires français.

Le principe de l'horloge en microgravité PHARAO s'apparente à celui de l'horloge de Essen et Parry, où les atomes du jet atomique sont remplacés par un jet ultra-lent d'atomes refroidis par laser (voir la figure 4). 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, on espère produire une courbe de résonance cinq à dix fois plus étroite que dans une fontaine atomique, soit près de 10 000 fois plus étroite 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 sera installée en 2013 à bord de la Station spatiale internationale, en orbite autour de la Terre à une altitude moyenne de 400 kilomètres selon une période d'environ une heure et demie, soit 5 400 secondes.

Outre l'horloge PHARAO, la mission spatiale ACES comporte un maser à hydrogène développé en Suisse, qui remplace l'oscillateur à quartz, un système de comparaison de temps sol-bord ultraprécis par échange de signaux radio développé en Allemagne, un transfert de temps par laser, un récepteur GPS/GALILEO (le futur système européen de localisation par satellite) et des équipements de support (ordinateur de bord, ...). L'ensemble pèse 220 kilogrammes et consomme moins de 450 watts, soit la puissance requise pour faire fonctionner en même temps... sept lampes à incandescence de 60 watts.

... pour vérifier l'effet Einstein

Les objectifs scientifiques d'une telle mission comportent plusieurs volets. Tout d'abord, l'horloge PHARAO en microgravité et le maser à hydrogène réaliseront dans l'espace une échelle de temps combinée de très haute stabilité. Le maser à hydrogène est en effet une horloge atomique très stable à court terme, alors que l'horloge PHARAO est très stable à moyen et long termes. En asservissant le maser sur l'horloge PHARAO, on combinera ces propriétés, qui conduiront à une échelle de temps très stable à court, moyen et long termes.

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 prévu par la relativité générale : la fréquence de l'horloge PHARAO, mesurée par le réseau d'horloges au sol, apparaîtra plus élevée que la fréquence des horloges terrestres d'une quantité gH/c^2 , où g est l'accélération de la pesanteur, H l'altitude de la station spatiale et c la vitesse de la lumière. En d'autres termes, le temps s'écoule plus vite lorsqu'on s'éloigne du champ gravitationnel de la Terre.

À l'altitude de 400 kilomètres, on attend un décalage relatif en fréquence de $4,5 \times 10^{-11}$. Avec des horloges stables dont l'incertitude en fréquence n'excède pas 10^{-16} , l'effet Einstein pourra être testé à 2×10^{-6} près – une amélioration d'un facteur 70 par rapport à la précédente expérience spatiale *Gravity Probe A* de la NASA en 1976. Cette expérience a comparé pendant deux heures la fréquence d'un maser envoyé à bord d'une

fusée sonde à 20 000 kilomètres d'altitude à celle d'un maser au sol et constitue encore aujourd'hui le test le plus précis de l'effet Einstein.

En second lieu, grâce à cette échelle de temps spatiale très stable, 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 d'autres atomes ou encore d'autres transitions atomiques. Cela permettra alors de tester une idée soulevée par le physicien britannique Paul Dirac (1902-1984) : les constantes fondamentales de la physique sont-elles 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} par an.

Par exemple, la « constante de structure fine » 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 change-t-il avec l'âge de l'Univers ? L'enjeu de cette recherche est considérable : si l'on détecte une variation de l'une de ces quantités, ce sera le signe que le principe d'équivalence, l'un des fondements, depuis les travaux d'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... Rappelons que les astrophysiciens nous indiquent que près de 80 pour cent de la masse de l'Univers visible aujourd'hui est constituée de matière noire d'origine inconnue : cette matière interagirait-elle avec la matière visible selon un type de force encore inconnu ?

Mesurer le géoïde terrestre

Outre les tests des lois fondamentales de la physique et l'amélioration du Temps atomique international par comparaison entre horloges, la mission ACES comporte des objectifs scientifiques appliqués. Le premier a trait à la géodésie. Une fois testée la validité du décalage gravitationnel des horloges, on pourra utiliser l'effet Einstein pour évaluer le relief terrestre selon une nouvelle méthode : la détermination de la différence des potentiels gravitationnels entre deux horloges distantes.

L'AUTEUR



Christophe SALOMON, directeur de recherche au CNRS, dirige le groupe « Gaz de Fermi ultrafroids » au sein du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure, à Paris, une des équipes engagées dans le projet PHARAO.

✓ POUR INFO

Le 27 novembre, la Société française de physique et la Bibliothèque nationale de France organisent la **12^e rencontre Physique et interrogations fondamentales** sur le thème : « Aux frontières de la connaissance : les instruments de l'extrême ». Christophe Salomon y évoquera à 10h15 la mesure du temps. Pour en savoir plus : <http://sfp.in2p3.fr/CP/pifn/fren12.htm>

✓ BIBLIOGRAPHIE

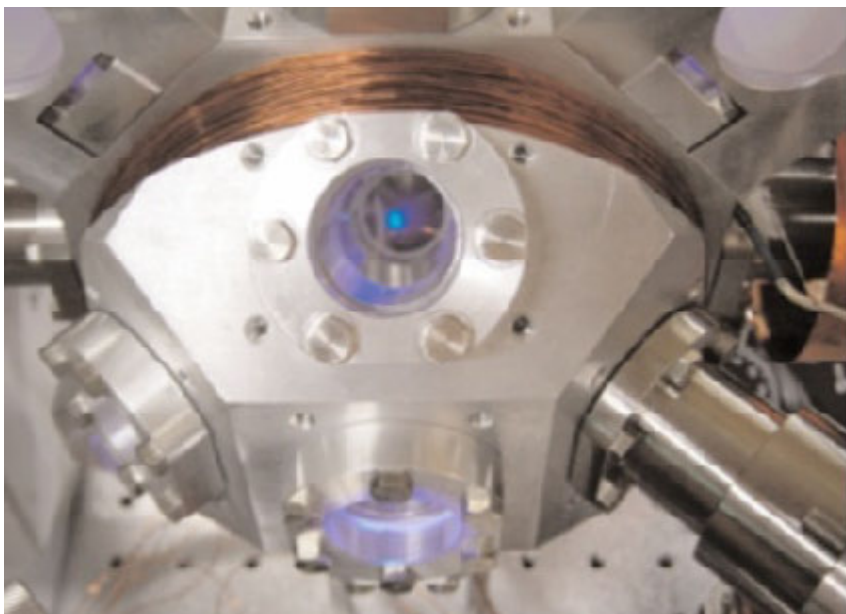
L. Cacciapuoti et Ch. Salomon, *Space clocks and fundamental tests : the ACES experiments*, *European Physical Journal [Special topics]*, vol. 172, pp. 57-68, 2009.

S. Schiller et al., *Optical clocks in space*, *Nuclear Physics B* [Proc. Suppl.], vol. 166, pp. 300-302, 2007.

G. M. Tino et al., *Atom interferometers and atomic clocks : new quantum sensors for fundamental physics experiments in space*, *Nuclear Physics B* [Proc. Suppl.], vol. 166, pp. 159-165, 2007.

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

M. Mashaal, *La relativité à l'épreuve du décimètre*, *Pour la Science*, 23 septembre 2010, en ligne sur : <http://tinyurl.com/mm100923>.



5. 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 incertitude en fréquence de l'ordre de 10^{-18} .

Le potentiel gravitationnel est une grandeur physique qui traduit l'attraction qu'exerce une masse (en l'occurrence la Terre) sur toute autre masse. La force de pesanteur associée à ce potentiel dépend des deux masses et de la distance les séparant. 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. Leur écart de fréquence sera directement imputable à leur différence de potentiel gravitationnel.

Cette nouvelle méthode de géodésie pourra être comparée à celles utilisées actuellement pour déterminer le géoïde terrestre, surface où le potentiel gravitationnel est égal en tout point et qui décrit le mieux le champ gravitationnel de la Terre. Les méthodes actuelles reposent sur des missions spatiales ou des méthodes de nivellement terrestres. La mission ACES vise à montrer que ce nouveau type de géodésie relativiste est possible avec une sensibilité en distance verticale de l'ordre de dix centimètres.

ACES s'appuiera sur les derniers développements d'horloges optiques, telles celles mises au point par l'équipe de David Wineland au NIST, l'Institut américain des étalons et de la technologie, à Boulder. Cette équipe vient de montrer que la sensibilité des horloges optiques actuelles est telle que l'effet Einstein peut être détecté

sur une distance de seulement 30 centimètres ! (Pour transformer cette démonstration de principe en test de la relativité, il faudra bien sûr augmenter cette distance à bien plus grande échelle en envoyant ces nouvelles horloges dans l'espace ; plusieurs propositions dans ce sens pour prendre le relais de la mission ACES/PHARAO à l'horizon 2022 sont en cours.)

Si l'on extrapole les performances des horloges actuelles dans dix ans, les horloges optiques devraient atteindre une stabilité de fréquence de 10^{-18} , soit l'équivalent de un centimètre de décalage gravitationnel. À cette échelle, le potentiel terrestre n'est plus du tout stable ; il varie selon l'état des marées océaniques, la pression atmosphérique, les vents et le niveau de l'eau dans les nappes phréatiques. Ainsi, si les horloges deviennent un nouveau type de détecteur géodésique, on peut craindre que ces fluctuations du potentiel terrestre ne limitent la qualité de la mesure du temps et de ses applications.

Une solution possible sera d'installer dans l'espace une ou plusieurs horloges ultrastables de façon à s'affranchir de ces fluctuations, dont l'influence décroît très vite lorsqu'on s'éloigne de la surface terrestre.

Une seconde classe d'applications repose sur l'utilisation du récepteur GPS/GALILEO placé sur la plateforme ACES pour étudier l'atmosphère terrestre.

Lorsqu'ils apparaissent ou disparaissent au-dessus de l'horizon vu de la Station spatiale internationale, les signaux émis par les satellites du système GPS sont perturbés par la vapeur d'eau de l'atmosphère qu'ils traversent. De même, ils sont affectés par les différences de température en fonction de l'altitude. Les météorologues utilisent ces signaux pour reconstituer une carte des zones nuageuses et les profils de température de l'atmosphère. Une autre direction de recherche est l'exploitation de la réflexion des signaux GPS sur la surface de la mer, qui donne accès à la hauteur des vagues et à leur direction.

L'avenir de la mesure du temps

La mission spatiale ACES aborde la dernière phase de réalisation avant son lancement vers la Station spatiale internationale. Les modèles d'ingénierie des instruments ont été réalisés et testés durant les années 2008-2010. L'horloge PHARAO et les autres instruments de vol sont en cours de fabrication par les industriels. 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 plateforme 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.

Jusqu'où les horloges atomiques pourront-elles progresser avant qu'une nouvelle technologie ne vienne les surpasser ? Après 45 ans de bons et loyaux services, la définition actuelle de la seconde fondée sur l'atome de césium est aujourd'hui dépassée d'un facteur 20 par les horloges optiques. Il faudra donc changer la définition de la seconde du Système international. Les atomes candidats sont nombreux – strontium (voir la figure 5), ytterbium, mercure, aluminium... – et les travaux en laboratoire explorent plusieurs pistes pour atteindre des incertitudes en fréquence inférieures à 10^{-18} , voire 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 ! ■