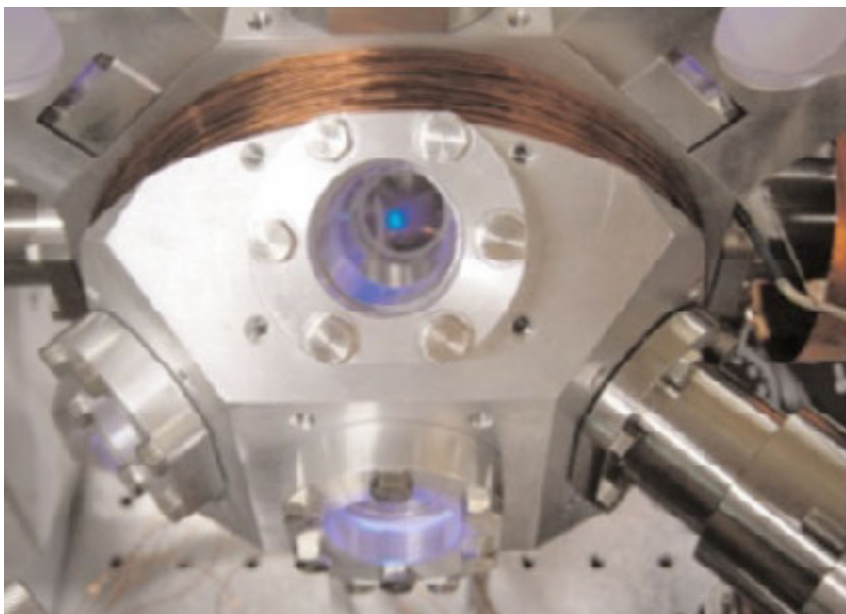




**5. UNE HORLOGE OPTIQUE À ATOMES DE STRONTIUM** refroidis par laser en cours de développement par l'équipe de Pierre Lemonde au Laboratoire LNE-SYRTE de l'Observatoire de Paris. La fluorescence bleue des atomes de strontium est visible au centre de l'enceinte à vide. Ce type d'horloge est l'un des plus 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 ! ■

Philippe Boulanger

# Les paradoxes temporels

Ils résultent notamment de l'impossibilité de voyager dans le futur ou le passé, de l'irréversibilité du temps, et de sa division à l'infini.

Il est difficile de méditer sur le temps sans ressentir avec acuité les limites de notre intelligence, car le temps a ses caractéristiques évanescentes qui estompent notre compréhension. Nous ne mesurons pas ce que le temps est, mais ce qu'il fait devenir, comment notre environnement change « avec le temps ». Marie Bonaparte, arrière-petite nièce de l'empereur et l'une des premières psychanalystes françaises, exprimait cela dans un chiasme : « Ainsi, le temps me fait et je fais le temps. »

Longtemps les échelons du temps ont été astronomiques, la longueur du jour, du mois lunaire, d'une année. Aussi l'imagination concevait-elle difficilement des durées plus importantes. Il a fallu que l'on sache mesurer des désintégrations atomiques extrêmement lentes pour que l'on puisse évaluer des durées plus longues, des temps de l'ordre de l'ancienneté du monde. Notons qu'à mesure que l'on perfectionnait les mesures des temps longs, la Terre vieillissait : aujourd'hui les mesures convergent vers 4,55 milliards d'années. On peut penser que notre Terre ne vieillira plus beaucoup.

Le temps peut-il varier ? Comme nous mesurons les variations des choses par rapport au temps, avec quelles unités pour-

rions-nous mesurer les changements de l'écoulement du temps ? L'évolution du temps par rapport à lui-même suggère un écoulement invariable. Et si le temps variait, pourrions-nous le savoir ? Qu'advierait-il si tout à coup une seconde durait le double ? Que remarquerions-nous ? Rien semble-t-il, selon les physiciens ! Notons que le doublement des longueurs, contrairement au doublement du temps, serait visible, car les aires seraient multipliées par quatre et les volumes (donc les masses) par huit : de nombreux monuments s'écrouleraient à cause de l'augmentation de la pression sur les structures. Et si le temps s'arrêtait et si l'Univers se figeait, le remarquerions-nous ? Non, car la mécanique quantique indique que notre seule observation ferait repartir le temps !

Les ouvrages de fiction ont rêvé que le temps pouvait changer pour certaines personnes comme la Belle au bois dormant ou Rip Van Winkle ; Dieu a arrêté le Soleil pour que Josué puisse battre les Amoriens.

Tout cela n'était que légendes et rêveries jusqu'à la relativité restreinte d'Einstein, il y a un siècle. Pour préserver le déroulement de la causalité, où la cause précède toujours l'effet, il fallait une vitesse limite et finie à tout phénomène (si la

vitesse était infinie, la cause coïnciderait avec l'effet et n'en pourrait se distinguer). La vitesse limite de propagation de la cause fut, à défaut de plus vraisemblable, la vitesse des particules de masse nulle, sans inertie : les photons. Mais alors on ne pouvait ajouter de vitesse à cette vitesse, et les rapports des longueurs et du temps devaient être modifiés en conséquence. Le temps s'écoulait plus lentement à l'approche de la vitesse de la lumière.

Ce qui introduisit le paradoxe des jumeaux, dit encore du voyageur de Langevin : un voyageur partant de la Terre et se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière vieillirait moins vite que son jumeau sédentaire et, à son retour sur Terre, retrouverait donc son frère beaucoup plus vieux que lui. Comme le jumeau sur Terre pourrait tenir le même raisonnement puisque, pour son jumeau voyageur, il se déplacerait à une vitesse proche de celle de la lumière, ils seraient, semblait-il, tous les deux plus jeunes que l'autre... Le paradoxe n'est que psychologique, car le jumeau qui a voyagé ne s'est pas déplacé à vitesse constante, de sorte que le calcul doit être modifié. Le jumeau qui aurait fait l'aller-retour en fusée serait vraiment plus jeune.