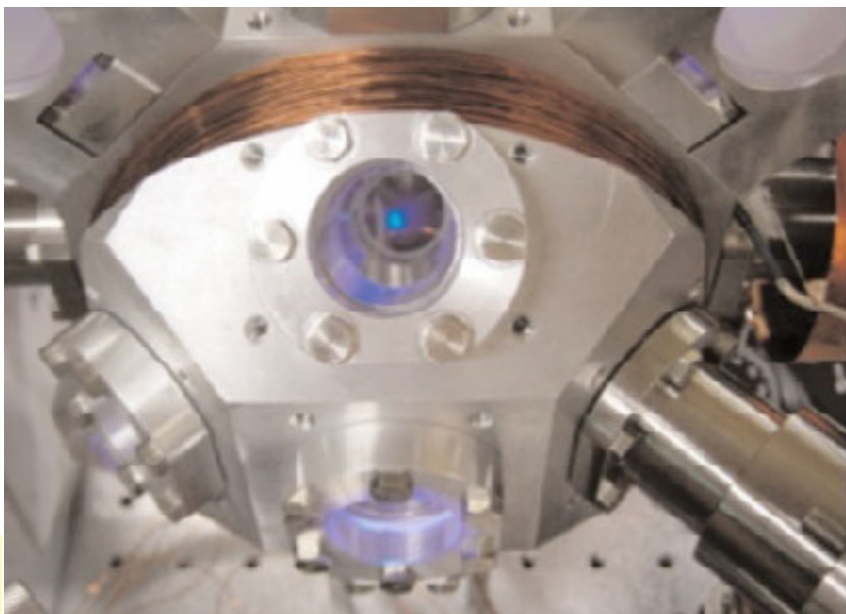




5. UNE HORLOGE OPTIQUE À ATOMES DE STRONTIUM refroidis par laser en cours de développement par l'équipe de Pierre Lemonde au Laboratoire LNE-SYRTE de l'Observatoire de Paris. La fluorescence bleue des atomes de strontium est visible au centre de l'enceinte à vide. Ce type d'horloge est l'un des plus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