

par le détecteur que l'intervalle de temps entre les deux interactions est grand (voir la figure 2b). L'erreur journalière de cette première horloge à césium n'était ainsi que de 0,00001 seconde, bien plus faible que l'erreur d'un quartz ou des meilleurs systèmes mécaniques.

La 13^e 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 9192631770 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 système de géolocalisation par satellite GPS.

Au début des années 1990, les atomes refroidis par laser ont permis d'augmenter encore la précision des horloges à césium de 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 sept millimètres par seconde, soit 30 000 fois plus lente qu'à température ambiante. Ils peuvent alors être utilisés en fontaine atomique, c'est-à-dire être projetés en l'air à la verticale à travers la cavité soumise à l'onde excita-

trice, et retomber par le même chemin (voir la figure 3). Par cette méthode, on obtient un intervalle de temps entre les deux interactions avec l'onde électromagnétique excitatrice approchant une seconde – une durée 100 à 1 000 fois plus longue que dans l'horloge à jet atomique de Essen et Parry. Ces horloges présentent une erreur de dix picosecondes (10^{-12} seconde) par jour et sont aujourd'hui à la base de la réalisation du Temps atomique international (TAI), 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.

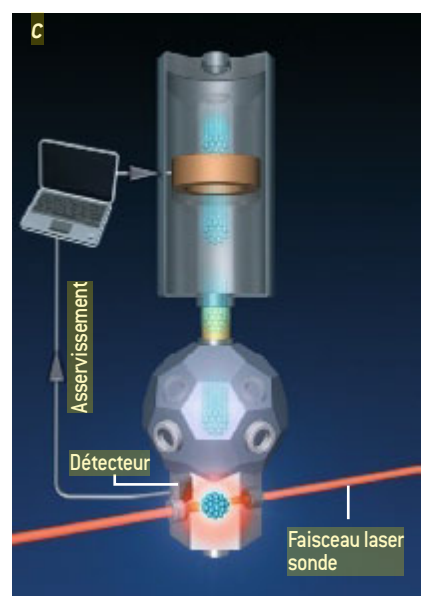
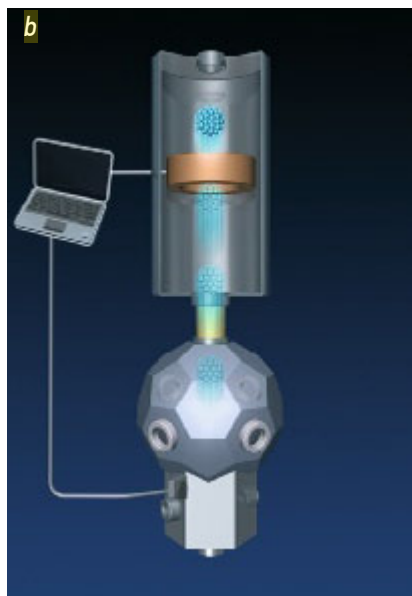
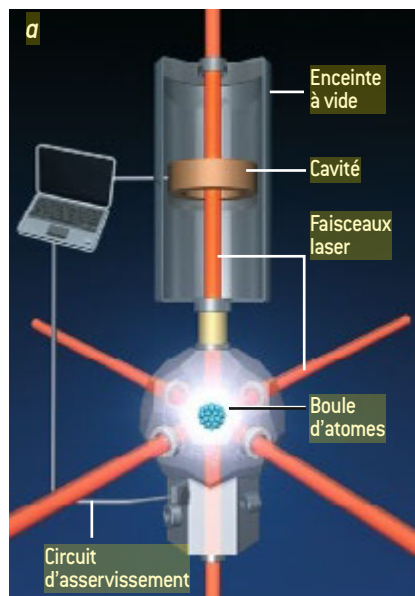
L'avènement des horloges optiques

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 tous les trois milliards d'années ou encore 15 secondes sur l'âge de l'Univers ! Ces nouvelles horloges sont des horloges optiques : les atomes sont excités non plus par un champ électromagnétique de fréquence 10^{10} hertz (l'équivalent d'un pendule qui battrait à dix milliards de périodes par seconde), comme dans l'horloge à césium, mais par un champ

lumineux qui oscille 100 000 fois plus vite, à 10^{15} hertz.

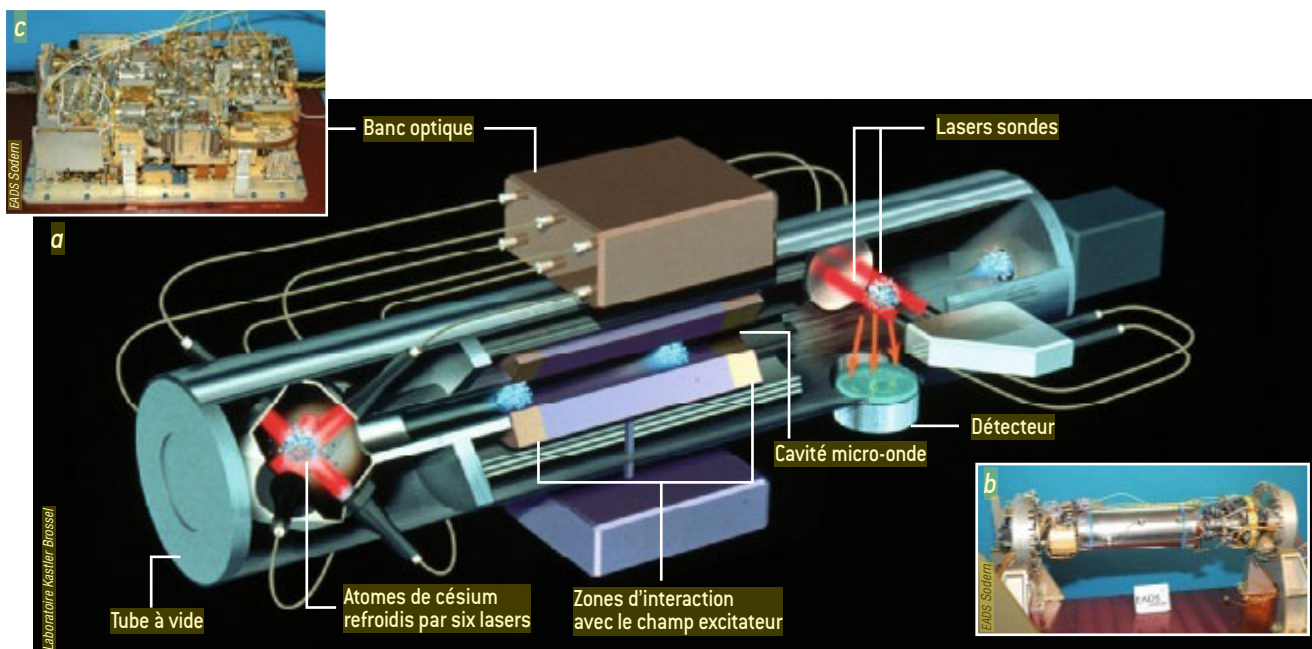
Ce champ lumineux est produit par un laser qui, comme l'oscillateur à quartz, est asservi sur une transition entre deux niveaux d'énergie des atomes. Cette transition correspond à une fréquence du spectre visible ou du proche ultraviolet. Les oscillations du champ lumineux étant bien plus rapides que celles du pendule, leur période est aussi beaucoup plus courte ; la mesure d'un infime intervalle de temps en comptant un nombre entier de périodes est donc *a priori* plus aisée avec une horloge optique qu'avec un pendule. Toutefois, comment compter ces oscillations si rapides ? Aucun photodétecteur n'est capable de répondre à un champ qui oscille aussi vite.

C'est ici que la contribution des prix Nobel de physique 2005, John Hall et Theodor Hänsch, est cruciale. Ces deux chercheurs et leurs équipes ont mis au point un « diviseur » de fréquences optiques efficace et simple à mettre en œuvre. Il repose sur l'utilisation d'un laser femtoseconde – un laser qui émet des impulsions ultracourtes (d'une durée de l'ordre de quelques femtosecondes, soit 10^{-15} seconde). Dans le domaine des fréquences, ces impulsions se traduisent par des raies régulièrement espacées, à l'image des dents d'un peigne – d'où leur nom « peigne de fréquence ». L'espacement des dents du peigne



3. UNE HORLOGE À FONTAINE ATOMIQUE : les atomes de césium sont refroidis par laser à une température de un microkelvin (a) et lancés vers le haut avec une vitesse de quatre mètres par seconde (b). Ils retombent selon le même chemin sous l'effet de la gravité (c). À la montée et à la descente, ils traversent la cavité micro-onde qui contient le champ excitateur. La durée entre les deux interactions atomes-champ

atteint 0,5 seconde et est environ 100 fois plus longue que dans une horloge à jet thermique. Les atomes excités par le champ micro-onde sont comptés par la fluorescence qu'ils émettent lorsqu'ils sont éclairés par un faisceau sonde (c). Un détecteur transmet l'information à un ordinateur qui verrouille la fréquence du champ excitateur sur la fréquence ν_0 de l'atome.



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 ultraléger 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.