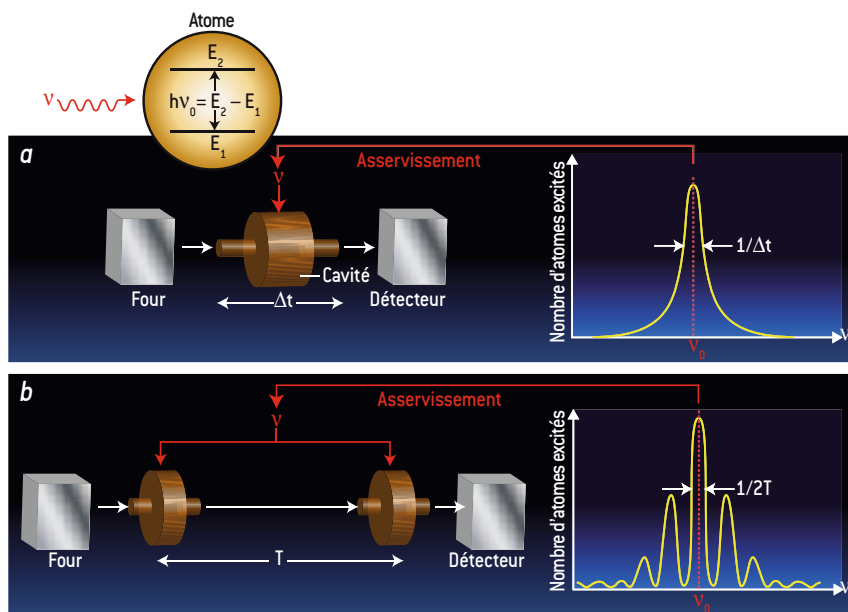




2. PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE : une onde électromagnétique de fréquence ν excite un ensemble d'atomes de césium de l'état d'énergie E_1 à l'état d'énergie E_2 . Issus d'un four, les atomes forment un jet qui traverse une cavité où l'onde est appliquée. Le détecteur compte le nombre d'atomes portés dans l'état excité. Lorsqu'on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0 , le nombre d'atomes excités fournit une courbe en cloche dont la largeur est inversement proportionnelle au temps d'interaction Δt de l'onde et des atomes. Un asservissement électronique permet de verrouiller la fréquence du rayonnement sur la fréquence de l'atome (a) ; une variante consiste à séparer l'onde appliquée en deux parties (b). Les atomes subissent deux interactions successives séparées d'un intervalle de temps T . Il en résulte un phénomène d'interférences qui produit des franges de largeur $1/2T$. Plus les atomes sont lents, plus les franges seront étroites et meilleure sera l'horloge.

régulières, c'est-à-dire périodiques. En comptant le nombre d'oscillations du pendule, on mesure un intervalle de temps, réalisant ainsi une horloge. Plus la période est courte, plus élevé sera le nombre d'oscillations dans un intervalle de temps donné, et plus précise sera la mesure.

La période T 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 les limites du dispositif : si la longueur du fil change, à cause de la température par exemple, l'horloge perdra sa précision ; il en est de même si l'accélération de la pesanteur change (par exemple si l'on prend de l'altitude).

Poussés par les enjeux de la navigation transocéanique et la détermination de la longitude, mais aussi par les sommes promises par les souverains des deux siècles suivants, les pendules, montres mécaniques et chronomètres n'ont cessé de s'améliorer. Combattant l'influence néfaste des changements de température et d'humidité sur le fonctionnement de ses chronomètres, l'horloger britannique John Harrison finit par produire en 1759, après 40 années d'efforts, un instrument qui présentait une erreur inférieure à un dixième de seconde par jour. Son chronomètre, qui alliait une mécanique de précision à un choix astucieux de métaux, fut testé en mer

par un navire britannique qui fit l'aller-retour Portsmouth-les Antilles en un peu moins de trois mois. Au retour, le chronomètre embarqué avait moins de cinq secondes d'écart avec ceux restés au sol. Harrison reçut pour cet exploit un prix de 40000 livres, une somme considérable pour l'époque !

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 piézo-électriques 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). Les montres et oscillateurs à quartz ont envahi le 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. L'énergie d'un atome est quantifiée : elle ne peut prendre que des valeurs discrètes, déterminées par les lois de la mécanique quantique qui gouverne le

comportement des objets microscopiques. Les niveaux d'énergie correspondant à ces valeurs 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 à Tokyo. Ce n'est pas le cas des pendules ou des oscillateurs à quartz, difficiles à réaliser à l'identique. L'idée est donc d'empêcher la dérive de l'oscillateur à quartz en verrouillant – en asservissant – la fréquence de ses oscillations sur une fréquence caractéristique de l'atome, correspondant à la différence entre deux niveaux d'énergie particuliers.

Pour ce faire, on envoie un jet d'atomes dans une cavité soumise au champ électromagnétique produit par l'oscillateur à quartz. Les deux niveaux d'énergie atomiques considérés sont E_1 (fondamental) et E_2 (excité), séparés par une énergie $h\nu_0$, où ν_0 est une fréquence et h la constante de Planck. Avant leur passage, les atomes sont dans l'état d'énergie E_1 ; lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique appliquée à la cavité est proche de ν_0 , les atomes sont portés dans l'état excité E_2 . Un détecteur compte le nombre d'atomes excités quand on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0 : on obtient une courbe en cloche – dite courbe de résonance – centrée sur ν_0 dont la largeur est inversement proportionnelle à la durée d'interaction de l'onde et des atomes. Par rétroaction, un montage électronique verrouille la fréquence de l'onde sur la fréquence ν_0 de l'atome : le montage électronique vérifie en permanence que la fréquence de l'oscillateur à quartz est très proche de ν_0 et la corrige si elle s'éloigne de cette valeur (voir la figure 2a).

Horloges à césium : atomes chauds, atomes froids

La première horloge à césium réalisée en Angleterre par Louis Essen et Jack Parry en 1955 fonctionnait sur ce principe, amélioré grâce à une méthode proposée par le physicien américain Norman Ramsey (qui lui vaudra le prix Nobel en 1989) : l'onde électromagnétique produite par l'oscillateur à quartz est divisée en deux parties, qui interagissent chacune avec les atomes sur leur parcours. Cette double interaction entraîne des interférences qui affinent d'autant plus le signal transmis

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.

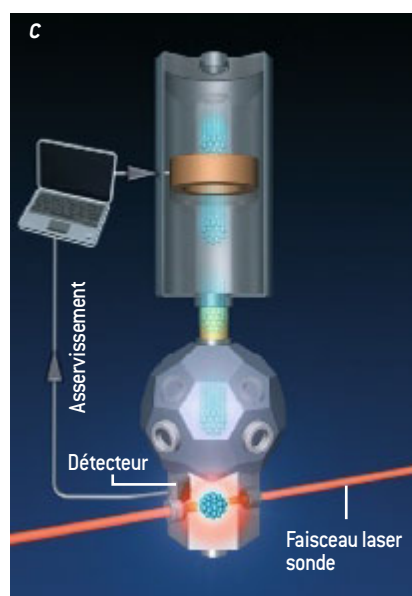
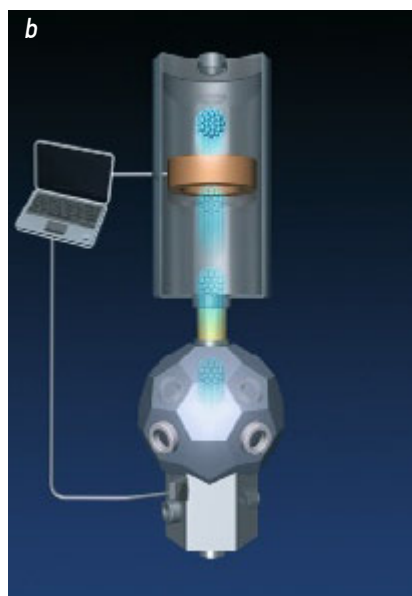
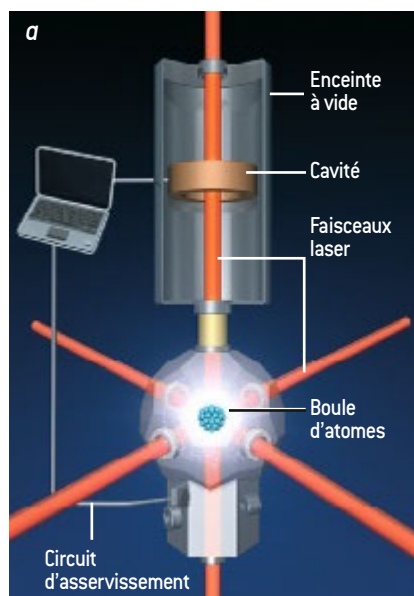
L'avènement des horloges optiques

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.