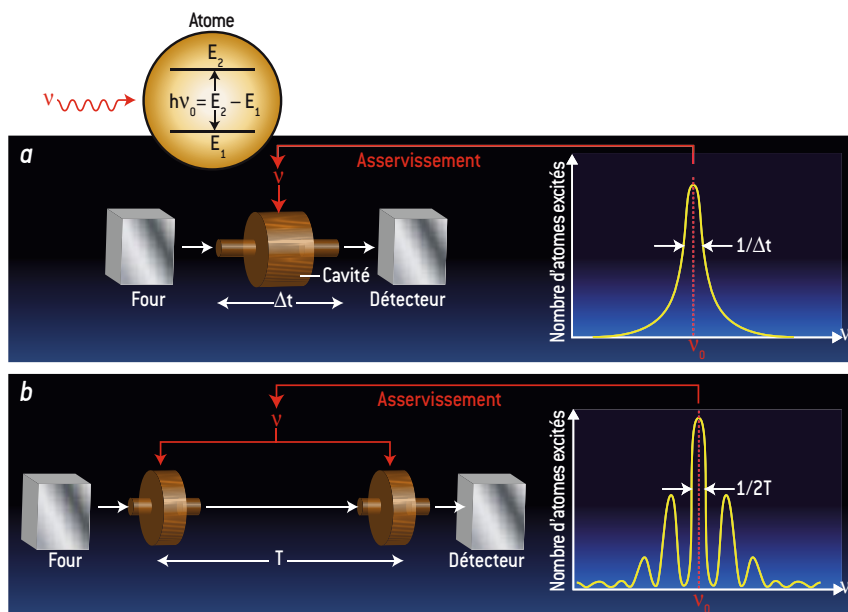




2. PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE : une onde électromagnétique de fréquence ν excite un ensemble d'atomes de césium de l'état d'énergie E_1 à l'état d'énergie E_2 . Issus d'un four, les atomes forment un jet qui traverse une cavité où l'onde est appliquée. Le détecteur compte le nombre d'atomes portés 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