

L'Horloge Atomique à Jet de Césium

Le principe d'une horloge atomique est basé sur un aspect fondamental de la physique quantique : un atome peut exister sous différents niveaux d'énergie qui sont quantifiés, c'est à dire que l'énergie d'un atome ne peut prendre que des valeurs bien précises, caractéristiques de la nature de l'atome (hydrogène, césium, etc.), et il lui est "interdit" de se trouver entre ces valeurs. Pour faire passer un atome d'un niveau d'énergie à un autre plus élevé (on parle de transition atomique), il doit recevoir un photon (un "grain élémentaire" de lumière) dont l'énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre le niveau final et le niveau initial. À l'inverse, pour revenir au niveau d'énergie initial, il doit lui même émettre un photon de même énergie.

Or, l'énergie transportée par un photon est directement proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique associée (à la couleur de la lumière). Par exemple, un photon de lumière violette transporte deux fois plus d'énergie qu'un photon de lumière rouge, qui en transporte plus qu'un photon infrarouge, qui en transporte plus qu'un photon d'onde radio ; rappelons que les ondes radio, même si elles ne sont pas visibles, sont de même nature que la lumière ; seule leur fréquence, nettement plus basse, les distingue.

Puisque les différences d'énergie entre les états d'un atome ont des valeurs parfaitement définies, il en est de même de la fréquence de l'onde électromagnétique pouvant changer leur état, ou pouvant être générée par leur changement d'état. Pour construire une horloge, il suffit donc d'utiliser la fréquence de cette onde électromagnétique et de compter ses périodes. Ainsi, de la même façon qu'une horloge comtoise comptabilise les oscillations de son balancier (en faisant avancer les aiguilles de son cadran à chaque période), ou qu'une horloge à quartz comptabilise les périodes des vibrations de son oscillateur à quartz, une horloge atomique comptabilise les périodes de l'onde électromagnétique ayant provoqué le changement d'état d'atomes (étalons passifs) ou ayant été générée par ce changement d'état (étalons actifs).

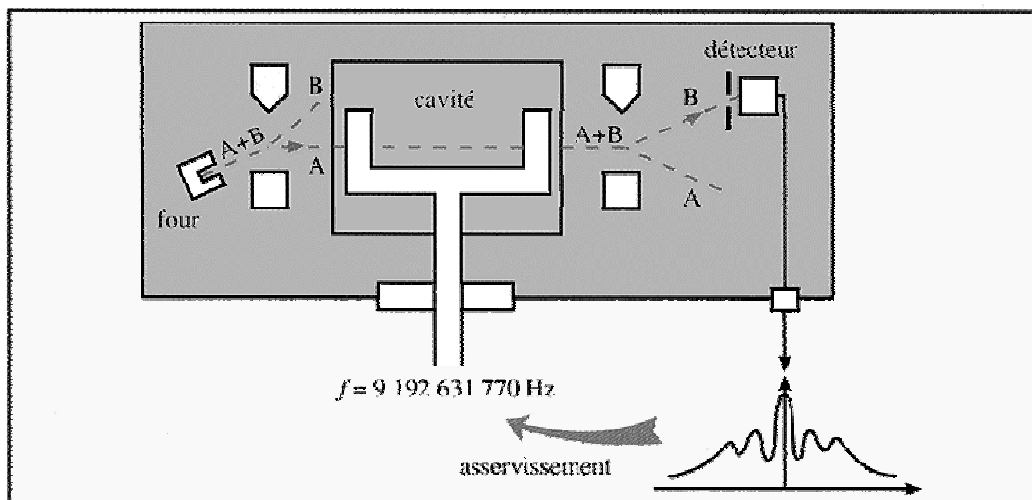


Figure 2: schéma de principe d'une horloge atomique à jet de césium

L'horloge atomique la plus stable et la plus exacte (elle est exacte par définition, puisque la seconde est définie par rapport à son fonctionnement) est actuellement l'horloge atomique à jet de césium. Son fonctionnement, illustré par la figure 2, peut être résumé de la façon suivante :

1. un oscillateur à quartz génère un signal électrique de fréquence 10 MHz (10 mégahertz, soit dix millions d'oscillations par seconde) aussi exactement que possible ;

2. un dispositif électronique multiplie la fréquence de base du signal issu de l'oscillateur à quartz pour obtenir un signal dont la fréquence vaut 9.192.631.770 Hz (étage multiplicateur de fréquence) ;
3. ce signal très haute fréquence (on parle de signal hyper-fréquence ou micro-onde) est injecté dans un guide d'onde dont la géométrie est telle qu'il entretient une résonance à cette fréquence particulière (cavité de Ramsey) ;
4. un four envoie un jet d'atomes de césium 133, qui, au départ, se trouvent dans plusieurs états d'énergie différents (symbolisés par état A et état B sur la figure 2) ;
5. un système de déflexion magnétique dévie les atomes qui ne sont pas dans l'état A : seuls les atomes dans l'état d'énergie A pénètrent dans la cavité de Ramsey (étage de sélection d'entrée) ;
6. si la fréquence injectée dans la cavité a très exactement la valeur 9.192.631.770 Hz, un grand nombre d'atomes passe de l'état A à l'état B (phase d'interrogation) ;
7. un second système de déflexion magnétique sépare la direction des atomes dans l'état A de celle des atomes dans l'état B (étage de sélection de sortie) ;
8. un détecteur, placé sur le trajet des atomes dans l'état B, compte le nombre d'atomes reçus (étage de détection) ;
9. en fonction de la réponse du détecteur, un système modifie la fréquence du quartz de telle sorte que le nombre d'atomes détectés dans l'état B soit maximal (boucle d'asservissement).

C'est donc un oscillateur à quartz qui est à la base d'une horloge atomique à jet de césium, les atomes de césium n'étant là que pour contrôler et ajuster la fréquence du signal généré par le quartz : c'est un étalon passif.

Il existe d'autres types d'horloges atomiques : les horloges à rubidium dont les performances sont moindres, les masers à hydrogène passifs et les masers à hydrogène actifs, dont la stabilité à court terme (durées inférieures à un jour) est meilleure que les étalons à césium, mais qui présentent une stabilité à long terme (et une exactitude) moins bonne.