

## LES HORLOGES ATOMIQUES

Par Michel Grand  
Septembre 2013

S'il y a une technique méconnue du grand public, c'est bien celle du temps atomique. D'autant que le mot atomique, qu'on le veuille ou non, conserve dans notre subconscient une connotation terrifiante. Cet article, loin de faire un point complet sur le sujet, donne un aperçu de ce véritable exploit technologique et de ses implications.

### Cocorico

Le **Bureau National de Métrologie** dans son **Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences** à l'Observatoire de Paris, 61, avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, a mis au point dès 1994, une horloge atomique dont l'exactitude relative est aujourd'hui de  $1,4 \times 10^{-15}$  (erreur d'environ une seconde tous les vingt millions d'années !). C'est à ce jour l'étalon de temps et de fréquence le plus précis du monde. (*On ne peut pas être mauvais en tout*)

Mais qu'y a-t-il d'atomique dans ces horloges ? A quoi bon cette phénoménale précision ? A qui cela sert-il ?

Nous allons voir, qu'une fois de plus, la physique des particules subatomiques, va venir au secours des chercheurs pour solutionner un problème mondial ( l'uniformisation planétaire du temps et des fréquences) et ainsi, contribuer aux avancées du monde moderne.

### Comment se mesure le temps ?:

N'importe quel « mesureur de temps » comporte deux parties : un oscillateur et un compteur.

L'oscillateur – ou étalon de fréquence – peut être tout système susceptible de fournir une vibration répétitive, périodique et surtout constante ( le balancier d'une pendule, le « spiral » d'une montre mécanique, les oscillations du courant alternatif, le cristal oscillant d'une montre à quartz, mais aussi les vibrations des électrons dans les atomes.

Le compteur lui se contente de compter en effectuant des multiplications et/ou des divisions, par des moyens mécaniques comme les rouages d'une montre ou par des circuits électroniques. Le but étant d'obtenir une expression aussi précise et constante que possible, de la seconde, de la minute, de l'heure, etc.

Mais l'objectif est toujours de fournir des intervalles de temps de la plus grande stabilité possible.

L'ennui est que, quelque soit le système utilisé, même avec la fameuse horloge de Shortt (voir annexe 1) qui fut longtemps le pilier de la mesure du temps astronomique ou les horloges à quartz les plus sophistiquées, on ne peut que constater que cette « stabilité » est limitée, à des valeurs qui naviguent au mieux dans la gamme de la micro-seconde ( $10^{-6}$ ), mais pas mieux.

Les différents États du Monde qui décidèrent de coordonner « leurs temps » à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle durent bien se contenter de ce qui existait, c'est à dire encore beaucoup moins bien que ce qui est décrit ci-dessus.

D'autant qu'il existait plusieurs sortes de temps :

- Le temps solaire, basé sur le mouvement apparent du Soleil dans le ciel .
- Le temps sidéral des astronomes qui repose sur l'observation du mouvement également apparent des étoiles par rapport à la Terre.
- Le temps des éphémérides basé sur la révolution des planètes autour du Soleil.

De plus, la Terre compliquait tout à cause du ralentissement de sa révolution par l'action des marées, (qui provoque par ailleurs l'éloignement de la lune de 4 cm par an, voir l'explication dans le mémoire *Pourquoi  $E = MC^2$* ).

En fait, la normalisation d'un temps universel et international fut un immense chantier parsemé de difficultés et d'embûches scientifiques mais également politiques. Je signale au passage que cette

longue et douloureuse croisade est délicieusement décrite dans le livre de Tony Jones « *Combien dure une seconde* »

Il fallait donc trouver une expression de la valeur du temps qui ne dépende ni de la Terre, ni de la Lune, ni des étoiles...et ni de la politique.

### **Les atomes au service de la mesure du temps :**

Un fois encore la solution vint de la physique des particules.

A commencer par lord Kelvin qui écrivit dans un cours en 1879 que les atomes pouvaient fournir un étalon de fréquence.

Pour comprendre le phénomène il nous faut d'abord passer par l'atome le plus simple de la nature : l'atome d'hydrogène.

Comme chacun le sait, l'atome d'hydrogène possède un seul proton (de charge électrique positive) et un seul électron (de charge électrique négative) C'est l'élément n°1 de l'univers.

Au sein de l'atome d'hydrogène, l'électron n'occupe que certaines orbites ou plus précisément, certains niveaux d'énergie (3 au total) . L'état où l'énergie est la plus basse est nommé le niveau fondamental. Les autres états sont dits « excités ».

Si l'on fournit à l'électron un « *quantum* » d'énergie suffisant, il peut « sauter » au niveau supérieur et ensuite redescendre vers le niveau fondamental en émettant un rayonnement électromagnétique dont l'énergie est exactement égale à celle qu'il avait absorbée en montant.

Cet échange d'énergie s'opère en fait par un échange de photons (voir annexe 2)

Si on vous parle de rayonnement électromagnétique, il vous vient automatiquement à l'esprit les termes « fréquence » et « longueur d'onde »

Il se trouve que l'énergie du photon est proportionnelle à la fréquence du rayonnement électromagnétique et donc, inversement proportionnelle à sa longueur d'onde.

Donc à un niveau d'énergie précis correspond une fréquence, soit une couleur dans la lumière visible ( par exemple le rouge pour l'hydrogène qui est émis à la chute d'un électron du troisième niveau vers le second).

Nous pourrions donc en principe utiliser la fréquence du rouge comme étalon de fréquence pour notre horloge.

L'inconvénient c'est que dans ce cas ( qui est valable en général pour la lumière visible) la fréquence en question est de  $10^{14}$  hertz.( un 1 avec 14 zéros). Comment maîtriser un balancier qui oscillerait 100'000 milliards de fois par seconde ?

Il fallait donc trouver un atome suffisamment « sympa » pour absorber et émettre des photons à des fréquences beaucoup plus basses, c'est à dire, si possible dans la gamme des ondes radio.

Heureusement, il est possible de fabriquer des ondes radio à partir des atomes. En effet, le proton et l'électron sont magnétiques et réagissent comme de minuscules aimants. Dans l'atome d'hydrogène, il n'y a que deux orientations possibles de ces deux aimants : soit ils pointent dans la même direction ( N-N ou S-S) soit ils pointent dans la direction opposée (N-S ou S-N). On dit qu'ils sont parallèles ou anti-parallèles.

Dans le premier cas la répulsion, oblige l'électron à s'éloigner quelque peu du noyau et bien sûr on assiste à l'effet inverse lorsque les deux aimants s'attirent.

De fait, selon l'orientation des aimants, l'électron d'hydrogène qui n'avait droit qu'à trois états discrets d'énergie peut en fait se trouver dans deux états voisins de l'un des états (y compris dans l'état fondamental).

Ces états portent le nom **d'états hyperfins**. Cette transition hyperfine est très utilisée par exemple par les radioastronomes, car c'est ce qui leur permet de détecter des nuages d'hydrogène dans les galaxies lointaines.

Ainsi, lors de l'inversion des polarités entre le proton et l'électron, l'électron passe d'un état hyperfin à l'autre et l'atome émet un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie entre ces deux états hyperfins. ; ce qui par bonheur correspond à une longueur d'onde de 21 cm soit 1420 mégahertz.

### **Le césium au secours de l'hydrogène :**

L'hydrogène est le seul atome neutre comportant un seul électron, mais d'autres éléments chimiques possèdent des propriétés similaires. Ce sont les métaux alcalins qui ont tous un électron « indiscipliné » dont « l'orbite » s'éloigne du noyau plus que les autres. Les métaux alcalins sont par ordre de masse atomique croissant : le lithium, le sodium, le potassium, le rubidium, le césium, et le francium.

A l'exception de cet électron « périphérique », les autres électrons sont appariés en polarité, ce qui fait que l'effet magnétique global est nul. Ainsi tout dépend de l'électron célibataire, qui finalement se comporte comme l'électron d'hydrogène en donnant lieu à une paire d'états hyperfins.

Pour des raisons de longueur d'onde, le choix s'est porté sur ce curieux métal que l'on peut couper comme du beurre, qui fond à 28 ° et qui porte le nom de **césium**.

L'atome de césium 133 a un noyau qui comporte 78 neutrons, 55 protons, ce qui pour un atome stable implique 55 électrons, dits périphériques, sauf que l'un d'entre eux est un peu plus « périphérique » que les autres.

C'est l'électron « indiscipliné » qui nous intéresse.

Sa fréquence de transition hyperfine est de 9.193 mégahertz et sa longueur d'onde de 3.26 cm ( en plein milieu du spectre des ondes radio dites micro-ondes) .

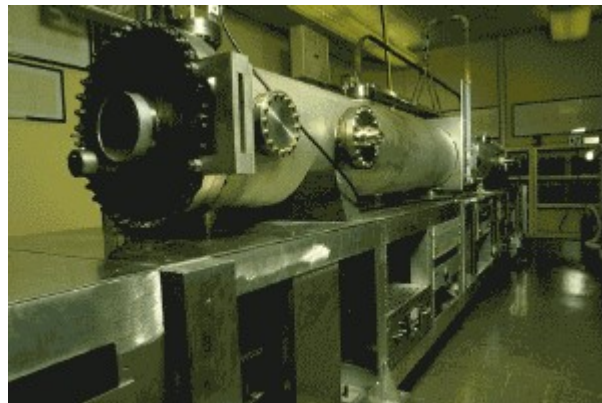
### **Comment fonctionne l'horloge atomique :**

Il existe de nombreux systèmes d'horloge atomique utilisant même des matériaux autres que le césium. Celles-ci vont du monstre de laboratoire Jusqu'aux horloges miniatures installées dans les satellites.

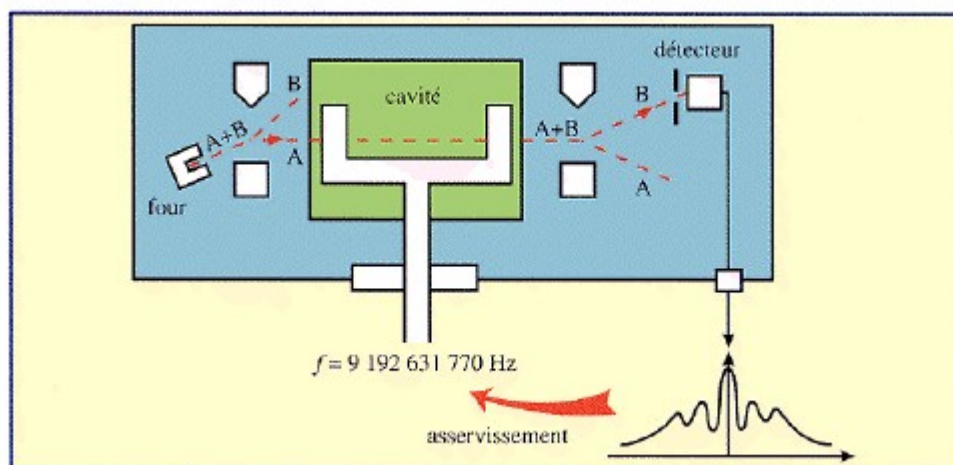
Nous nous contenterons de décrire le générateur de fréquence de transition le plus utilisé jusqu'aux années 90 soit l'étalon à jet d'atomes de césium.

L'objectif est d'accorder les vibrations d'un oscillateur à quartz ultra-stable sur la fréquence de transition hyperfine du césium, et de n'en plus bouger.

### Horloges à jet de césium



## PRINCIPE



Tous les éléments sont placés dans une enceinte à vide afin que les molécules d'air résiduelles n'empêchent pas le faisceau de césium de se propager en ligne droite. Moins d'un gramme de césium est chauffé à 200 ° dans un four pour en jaillir par une étroite fente à une vitesse d'environ 200m/s. C'est cela que l'on appelle le « jet d'atomes de césium ».

Comme expliqué plus haut, ces atomes sont pour la moitié (environ) dans l'état hyperfine haut (B) et pour l'autre moitié dans l'état hyperfine bas (A). Il faut d'abord les séparer. Pour cela on fait passer le jet d'atomes par un aimant spécial où, du fait de leurs propriétés magnétiques, ils seront déviés par le champ magnétique de l'aimant en fonction de leur état d'énergie. Ils émergent donc de l'aimant dans deux directions différentes. Ils sont alors prêts à subir une transition.

Les atomes de césium sont comparables à des récepteurs radio particulièrement sélectifs. Ils ignorent toute onde de mauvaise fréquence mais réagissent fortement à la fréquence précise des micro-ondes de 9193 mégahertz. Un atome de l'état bas (A) qui rencontre un photon de la bonne fréquence, l'absorbe et se trouve à l'état haut (B). À l'inverse, un atome dans l'état haut rencontrant un « bon » photon, va émettre un photon identique pour se retrouver dans l'état bas. Dans tous les cas, c'est l'électron externe du césium qui voit son axe des pôles magnétiques inversé par l'interaction avec les micro-ondes, ce qui change l'état de l'atome de césium.

Ces micro-ondes sont générées à une fréquence réglable par un oscillateur électronique. Elles sont envoyées dans un guide d'ondes appelé :cavité de Ramsey, qui se divise en deux bras, en forme de U renversé. Le jet de césium passe d'abord par un trou percé dans le premier bras du U puis dans un trou identique percé dans le deuxième bras. Lors de chacun des passages, le jet de césium reçoit une impulsion identique de micro-ondes.

Si la fréquence des micro-ondes est bien accordée sur la fréquence de transition, la première impulsion met les atomes dans un état fantomatique, une superposition quantique de deux états hyperfins, et la deuxième impulsion finit le travail en les expédiant dans l'état opposé.

Quand il émerge du second bras de la cavité de Ramsey, le jet de césium comporte à nouveau deux types d'atomes; ceux qui ont subi la transition et ceux qui ne l'ont pas subi. Un deuxième filtre magnétique les sépare alors, exactement comme la première fois. La configuration de l'appareil est conçue de telle sorte que seuls les atomes ayant subi la transition arrivent sur le détecteur ; les autres étant ignorés.

Le détecteur est constitué d'un fil métallique chauffé au rouge face à une plaque de métal. Rappelons-nous que l'électron externe du césium, (celui qui lui confère ces propriétés magnétiques), est très faiblement attaché au noyau. La température du fil est suffisante pour arracher cet électron, tout en laissant l'atome lui-même – devenu ion positif – rebondir sur la plaque métallique chargée négativement, où il est capturé.

Un courant électrique proportionnel au nombre d'atomes ayant subi la transition hyperfine est donc généré sur la plaque.

En faisant varier finement la fréquence de l'émetteur de micro-ondes qui alimente la cavité de Ramsey jusqu'à ce que le courant dans le détecteur soit maximum, on sait que la fréquence de l'oscillateur est égale à la fréquence de transition et qu'un maximum d'atomes ont subi cette transition.

Un système électronique permet ensuite de diviser la fréquence de l'oscillateur, et, au final, de fournir un top toutes les secondes — avec une exactitude relative d'environ  $10^{-14}$ , c'est-à-dire qu'au bout de plusieurs millions d'années, l'erreur accumulée par l'horloge serait inférieure à une seconde...

C'est ainsi que, depuis la 13<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures résolution 1 de 1967, « **la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133** »

Expression mathématique :

L'énergie d'un photon que nous noterons  $E$  est égal à sa fréquence  $\nu$  ( lettre grecque nu) multipliée par la constante de Planck notée  $h$ . Soit  $E = h\nu$  ; ou encore  $\nu = E/h$ .

Si on appelle « a » le premier niveau énergétique hyperfin et « b » le deuxième, la fréquence de la transition  $\nu_0$  a pour expression :  $\nu_0 = (E_b - E_a) / h$  laquelle, dans le processus développé plus haut, est égal à  $\nu$  la fréquence ajustée de l'oscillateur

*Note : La constante de Planck est un des piliers de la mécanique quantique. Elle définit la valeur du quantum minimum d'énergie ( quantité discrète évoquée plus haut ) . La constante de Planck possède les dimensions d'une énergie multipliée par le temps. Elle vaut environ  $6,63 \times 10^{-34}$  en joule.seconde, ou  $4,13 \times 10^{-15}$  en électron-volt.seconde.*

**Première application : le Temps Atomique International :** (voir annexe 3)

Les horloges atomiques servent tout d'abord à établir une échelle de temps mondiale, le « **Temps Atomique International** ». Pour cela, on centralise au **Bureau International des Poids et Mesures**, à Sèvres, en France, les données fournies par 260 horloges atomiques réparties de par le monde, elles-mêmes étalonnées à l'aide d'une douzaine d'étalons primaires de référence. C'est leur moyenne pondérée qui constitue le TAI ; chaque laboratoire reçoit alors l'écart mesuré entre le temps indiqué par son horloge et le TAI, ce qui permet d'effectuer des corrections.

Ces corrections permettent d'établir, suivant un protocole très complexe de coordination, ce que l'on appelle l'**UTC** ( Temps Universel Coordonné en français) remplaçant dorénavant le fameux **Greenwich Mean Time** (sauf pour les anglais car la Chambre des Communes n'a jamais trouvé le temps de voter l'amendement...).

**Deuxième application : Le GPS :**

Le GPS (Global Positioning System) américain et d'autres comme le GLONASS russe utilisent des horloges atomiques.

Le GPS est constitué d'un réseau de 24 satellites en orbite à 20 000 km d'altitude, équipés d'horloges atomiques offrant une couverture totale de la surface de la Terre

Chaque satellite envoie des signaux radio contenant des informations sur sa position et l'instant d'émission, données fournies de façon extrêmement précise grâce à l'horloge atomique embarquée.

Le calcul de la position du récepteur peut alors s'effectuer par trilatération), en déterminant les distances séparant le récepteur de trois au moins des satellites (la distance étant le produit de la vitesse de la lumière par le temps mis par les signaux pour parvenir au récepteur)

Pour que le système fonctionne correctement, il faut donc que les mesures du temps mis par les signaux soient ultra-précises. Une erreur de 1/1000 ° de seconde impliquerait une erreur de 300 km.

### **Troisième application : Vérification des équations de la relativité :**

De plus, une haute précision ne serait pas possible si l'on ne tenait pas compte des équations de la « relativité » et les effets de distorsion temporelle qui en découlent. La méthode doit tenir compte aussi bien de la gravité ( relativité générale) que du mouvement relatif (relativité restreinte), les deux facteurs de distorsion temporelle identifiés par Einstein

En ce qui concerne la gravité, une horloge embarquée sur un satellite orbitant à 20 000 km d'altitude bat plus vite qu'une horloge restée au sol parce qu'elle est plus éloignée du centre de gravité de la Terre. La différence est de quelques millièmes de seconde par jour.

Pour ce qui est du mouvement relatif, la rotation du satellite ( environ deux fois plus rapide que la rotation de la Terre) fait retarder l'horloge du satellite par rapport à une horloge au sol, ce qui entraînerait une erreur d'environ 12 km par jour.

En tenant compte de ces deux corrections relativistes, le GPS peut permettre de situer une position jusqu'à 2.5m.

En 1971, l'US Naval Observatory a fait embarquer des horloges au césium extrêmement précises à bord de deux avions, l'un volant vers l'ouest et l'autre volant vers l'est. Au retour les horloges ont été comparées à des horloges strictement identiques restées au sol. Dans cette expérience, deux effets entraient en jeu : un effet de relativité restreinte dû au déplacement des avions, et un effet de relativité générale dû à la faible pesanteur en altitude. L'horloge qui avait voyagé vers l'ouest avançait de 273 milliardièmes de seconde, celle qui avait voyagé vers l'est retardait de 59 milliardièmes de seconde, en parfait accord avec les calculs relativistes.

### **Quatrième application : La synchronisation des réseaux de télécommunications à haut débit (10 gigabits/s)**

Si une précision d'une seconde suffit largement à la synchronisation de la circulation des trains, il n'en est pas de même pour les réseaux numériques de communication. Depuis que les réseaux ont basculé dans l'ère des transmissions numériques, les taux d'émission des impulsions doivent être parfaitement synchronisés aux taux de réception. De même que l'on contrôle les heures de passage des trains de manière que deux trains ne soient pas sur la même voie en même temps, les trains d'impulsion numériques doivent être envoyés sur le réseau à des intervalles de temps déterminés par une horloge extrêmement précise ; et plus les informations qui circulent sur le réseau sont nombreuses, plus rigoureuse doit être la synchronisation.

L'Union Internationale des Télécommunications recommande une synchronisation des réseaux avec une précision de 1 pour 100 milliards ( $1/10^{11}$ ) l'équivalent d'un décalage d'une seconde au bout de 3000 ans.

C'est pourquoi les opérateurs de réseaux bien incapables de fournir une telle précision par leurs propres moyens, doivent acheter leur temps aux organismes comme le BIPM en France.

Compte tenu des masses gigantesques d'informations qui circulent aujourd'hui de par le monde, Il est facile d'imaginer ce que serait Internet et la téléphonie mobile sans ces outils hyper-performants.

### **Cinquième application : Uniformisation des unités de mesure**

Le fait de pouvoir définir l'unité de temps (la seconde) avec une précision inouïe, a donné l'idée aux scientifiques mesurer la vitesse de la lumière dans le vide aussi finement que possible. Ce qui fut fait en 1972 et a donné comme résultat 299 792 458 mètres par seconde. Il était facile d'en déduire que l'on pouvait disposer de cette mesure ultra précise pour donner une nouvelle définition du mètre, et

cela, tout simplement en renversant la vapeur c'est à dire en statuant que le mètre était la distance parcourue dans le vide par la lumière dans un intervalle de temps de  $1/299\,792\,458$  ° de seconde

Cette nouvelle définition qui date de 1983, et est toujours la seule officielle, remplaça la fameuse barre de platine iridié qui trônait au pavillon de Breteuil à Sèvres.

Rappelons que la vitesse de la lumière est un invariant, c'est à dire une constante universelle, qui ne dépend ni de la position, ni du mouvement d'un objet quelconque de l'Univers. Les physiciens sont très friands des invariants et rêvent d'unités qui ne dépendent pas d'objets terrestres comme le kilogramme en platine iridié du BIPM. Einstein lui-même estimait que toutes les unités devraient être liées à des constantes telles que  $h$ ,  $\pi$ ,  $e$  ...C' est pourquoi diverses pistes sont aujourd'hui encore explorées par les métrologues du monde entier.

Ainsi, il est probable que dans un prochain avenir, les sept unités de base du système SI, (la seconde, le mètre, le kilogramme, l'ampère, le degré kelvin, la candela, la mole), auront toutes une définition issue du modèle standard. (voir l'article « *les particules élémentaires* »)

*Je conseille à ce titre la lecture du livre de John D Barrow, mathématicien professeur à Cambridge, intitulé : « Les constantes de la nature ».*

## ANNEXE 1

### HORLOGE DE SHORTT



L'horloge de Shortt à pendule libre fut le pilier de la mesure astronomique du temps dans les années 1920-1930. L'enceinte sous vide située à gauche contient le pendule « maître » qui oscille librement. Celui-ci transmet un signal électrique aux pendules « esclaves » à droite.

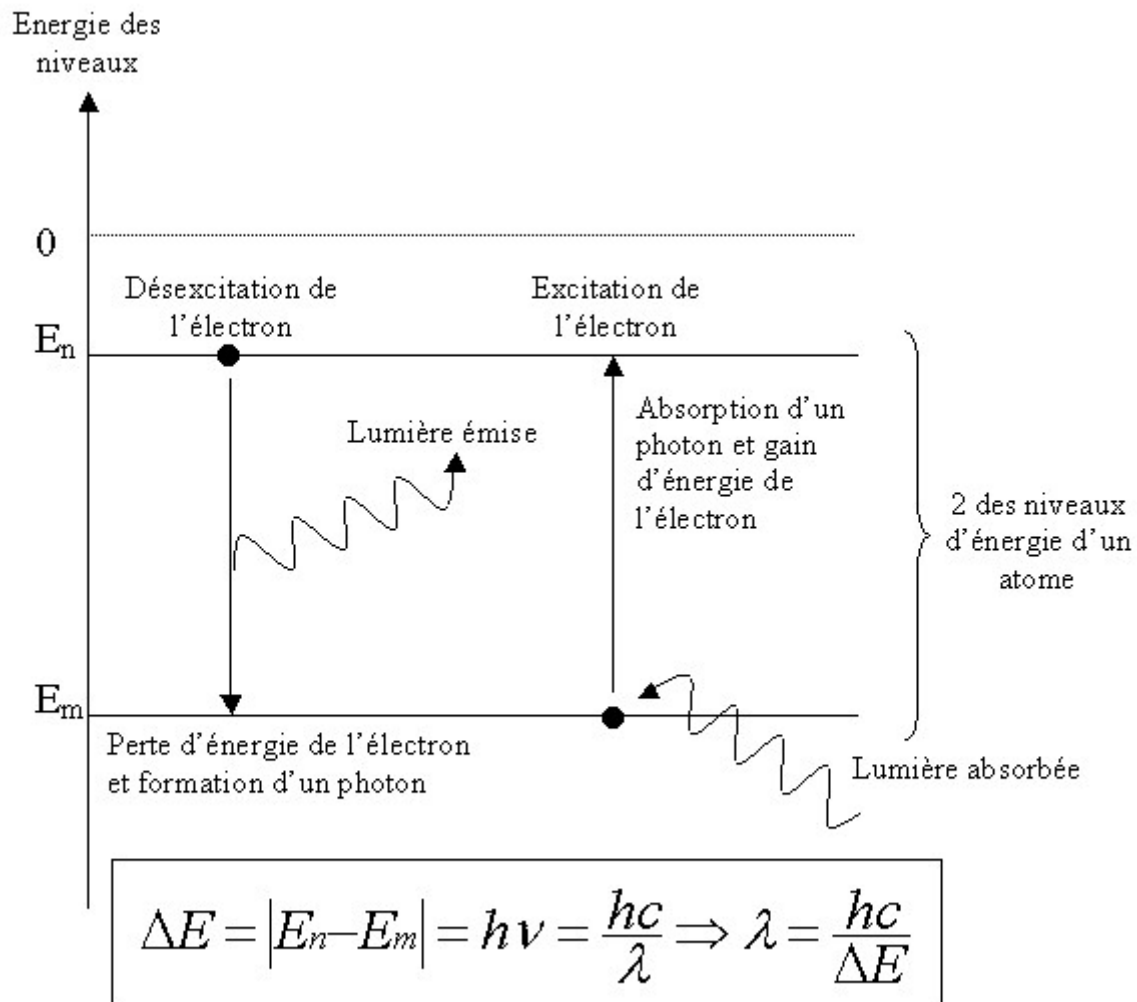
Un système complexe d'auto-compensation permet d'atteindre une précision de  $1/1000.000^{\circ}$  de seconde par jour.

Les expériences conduites par Shortt ont montré que si le vide est maintenu à 3 cm de mercure, l'énergie consommée par la flexion de la suspension est égale à l'énergie nécessaire pour mouvoir les molécules d'air résiduelles; en conséquence, il n'y a pas besoin d'un vide plus complet.



## ANNEXE 2

### SAUT DE NIVEAU D'ENERGIE D'UN ATOME SELON EMISSION OU ABSORPTION D'UN PHOTON



## ANNEXE 3

### HORLOGES ATOMIQUES



Horloge atomique commerciale à césium ayant servi à réaliser le temps légal français dans les années 1980 et comme référence pour l'horloge parlante

