

3) Mesure du temps : à l'aide de phénomènes périodiques bien choisis

Document 1, le cours de physique de Feynman (1963) :

En V.O. :

"We have implied that it is convenient if we start with some standard unit of time, say a day or a second, and refer all other times to some multiple or fraction of this unit. What shall we take as our basic standard of time? Shall we take the human pulse? If we compare pulses, we find that they seem to vary a lot. On comparing two clocks, one finds they do not vary so much. You might then say, well, let us take a clock. But whose clock? .../... It is rather difficult to decide whose clock we should take as a standard. Fortunately, we all share one clock—the earth. For a long time the rotational period of the earth has been taken as the basic standard of time. As measurements have been made more and more precise, however, it has been found that the rotation of the earth is not exactly periodic, when measured in terms of the best clocks. These "best" clocks are those which we have reason to believe are accurate because they agree with each other. We now believe that, for various reasons, some days are longer than others, some days are shorter, and on the average the period of the earth becomes a little longer as the centuries pass.

Until very recently we had found nothing much better than the earth's period, so all clocks have been related to the length of the day, and the second has been defined as 1/86400 of an average day. Recently we have been gaining experience with some natural oscillators which we now believe would provide a more constant time reference than the earth, and which are also based on a natural phenomenon available to everyone. These are the so-called "atomic clocks. "Their basic internal period is that of an atomic vibration which is very insensitive to the temperature or any other external effects. These clocks keep time to an accuracy of one part in 10⁹ or better. .../... We may expect that since it has been possible to build clocks much more accurate than astronomical time, there will soon be an agreement among scientists to define the unit of time in terms of one of the atomic clock standards."

En V.F. :

« Nous avons dit qu'il est commode de commencer avec une certaine unité étalon de temps, par exemple un jour ou une seconde, et de rapporter les autres temps à certains multiples ou certaines fractions de cette unité. Que devons-nous prendre comme notre étalon de base de temps ? Devons-nous choisir le pouls humain ? Si nous comparons les pouls entre eux, nous trouvons qu'ils semblent beaucoup varier. En comparant deux horloges, on trouve qu'elles ne varient pas autant. Vous pouvez alors dire : « Bien, choisissons une horloge. » Mais l'horloge de qui ?.../... Il est assez difficile de décider de qui nous choisirons la pendule pour en faire un étalon. Heureusement nous disposons tous d'une même horloge – la Terre. Pendant longtemps, la période de rotation de la Terre a été choisie comme l'étalon de base du temps. Lorsque les mesures ont été rendues de plus en plus précises, on a trouvé cependant que la rotation de la Terre n'est pas exactement périodique, lorsqu'elle est mesurée avec les meilleurs horloges. Ces « meilleures » horloges sont en accord entre elles. Nous pensons maintenant que, pour diverses raisons, certains jours sont plus longs que d'autres, certains jours plus courts, et qu'en moyenne la période de la Terre augmente un peu au cours des siècles.

Jusqu'à très récemment, nous n'avions rien trouvé de mieux que la période de la Terre, ainsi toutes les horloges se référaient à la longueur du jour, et la seconde avait été définie comme 1/86400 d'un jour moyen. Récemment, nous avons acquis de l'expérience avec certains oscillateurs naturels dont nous pensons maintenant qu'ils fourniront une référence de temps plus constante que la Terre, et qu'ils sont également basés sur des phénomènes naturels accessibles à tout le monde. Ce sont ce que l'on appelle les « horloges atomiques ». Leur période interne de base est celle d'une vibration atomique qui est très peu sensible à la température ou à tout autre effet externe. Ces horloges conservent leur régularité à une part pour 10⁹ ou mieux.../... Puisqu'il est possible de construire des horloges beaucoup plus précises que le temps astronomique, nous pouvons bientôt nous attendre à un accord entre les scientifiques, pour définir l'unité de temps en termes de l'un des étalons d'horloge atomique.

Document 2 : Définitions de la seconde

La définition de la seconde, l'unité SI de temps, a été établie selon les connaissances et les possibilités techniques de chaque époque.

Elle a d'abord été définie comme la fraction 1/86400 du jour solaire terrestre moyen. L'échelle de temps associée est le temps universel TU. Cette durée est proche de la période moyenne du battement du cœur d'un homme adulte au repos.

En 1956, pour tenir compte des imperfections de la rotation de la Terre qui ralentit notamment à cause des marées, elle a été basée sur la révolution de la Terre autour du Soleil et définie comme la fraction 1/31 556 925,9747 de l'année tropique 1900. C'est la seconde du temps des éphémérides TE.

Depuis la 13^e Conférence générale des poids et mesures, la seconde n'est plus définie par rapport à l'année, mais par rapport à une propriété de la matière ; cette unité de base du système international a été définie en 1967 dans les termes suivants :

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins $F=3$ et $F=4$ de l'état fondamental $^6\text{S}_{1/2}$ de l'atome de césium 133 (définition datant de 1967)

La seconde, étalon de mesure du temps, est ainsi un multiple de la période de l'onde émise par un atome de césium 133 lorsqu'un de ses électrons change de niveau d'énergie. On est ainsi passé de définitions, en quelque sorte descendantes, dans lesquelles la seconde résultait de la division d'un intervalle de durée connue en plus petits intervalles, à une définition ascendante où la seconde est multiple d'un intervalle plus petit.

Remarque : cette définition se réfère à un atome de césium au repos, à une température de 0 K. Cette dernière précision souligne le fait qu'à 300 K, la transition en question subit, par rapport à sa valeur théorique, un déplacement en fréquence dû aux effets de rayonnement. D'où une définition plus élargie du temps qui passe, prenant en compte les mesures réalisées par différents laboratoires.

Le Temps Atomique International TAI est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure (remplacé maintenant par le Bureau International des Poids et Mesures) sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système International d'unités.

On dispose aujourd'hui d'une exactitude allant jusqu'à la 14^e décimale (10^{-14}). L'exactitude et la stabilité de l'échelle du TAI obtenue principalement à partir d'horloges atomiques à jet de césium sont environ 100 000 fois supérieures à celles du temps des éphémérides. C'est d'ailleurs l'unité du SI la plus précisément connue.

De nombreuses expériences en cours sur des transitions atomiques à des fréquences optiques, beaucoup plus élevées que les 9 GHz de la définition actuelle de la seconde, indiquent clairement que les performances obtenues avec l'atome de césium sont ou seront dépassées de plusieurs ordres de grandeur dans un avenir proche. Il faut s'attendre à ce qu'une nouvelle définition de la seconde voie le jour dans la décennie 2010-2020, dès que le meilleur des différents atomes candidats (calcium, ytterbium, strontium, mercure...) aura été désigné par l'expérience. Elle sera toujours liée à une transition atomique. Cette nouvelle définition coïncidera peut-être avec l'abandon des secondes intercalaires et donc avec une définition de l'échelle de temps internationale de référence purement atomique indépendante de la rotation terrestre, donc de l'astronomie.

Questions

- 1) Etablir le lien entre la valeur 86400 évoquée dans le document 1 et diverses unités de temps (seconde, minute, heure et jour)
- 2) Etablir le lien avec la fréquence 9 GHz et le nombre de périodes (9192631770) permettant de définir la seconde (document 2)
- 3) Quelle est la différence d'énergie (en joules) entre les deux niveaux hyperfins présentés dans le document 2 ?
- 4) La valeur trouvée précédemment est-elle du même ordre de grandeur que celles que l'on mesure entre deux niveaux d'énergie électroniques traditionnels, qui sont de quelques eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) ? Commentez le résultat de la comparaison effectuée.

5) Synthèse : pourquoi un phénomène atomique (transition entre deux niveaux d'énergie) est-il plus fiable qu'un phénomène astronomique (rotation de la Terre) pour mener à une définition de l'unité de temps (la seconde) ?