

# Mesurer le temps avec des atomes

## Document 1 : Mesurer le temps avec des atomes !



**Galilée**  
1564-1642



**Huygens**  
1629-1695



**Harrison**  
1693-1776

Depuis l'Antiquité, les hommes ont cherché à mesurer le temps ou, plus précisément, les intervalles de temps. Ils se sont d'abord tournés vers les phénomènes naturels qui présentent une grande régularité comme la rotation de la Terre autour du Soleil, celle de la Lune autour de la Terre ou encore celle de la Terre sur elle-même pour définir des calendriers et des échelles de temps. Ils ont ensuite cherché à réaliser eux-mêmes des instruments toujours plus précis et l'un des plus anciens instruments connus est le sablier égyptien.

Cependant, il faudra attendre la découverte de l'isochronisme du pendule par Galilée, au début des années 1600, et sa mise en pratique par le physicien néerlandais Christiaan Huygens quelques décennies plus tard, pour que ces instruments commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour. Galilée a observé que les petites oscillations du pendule sont indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement 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...

...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.

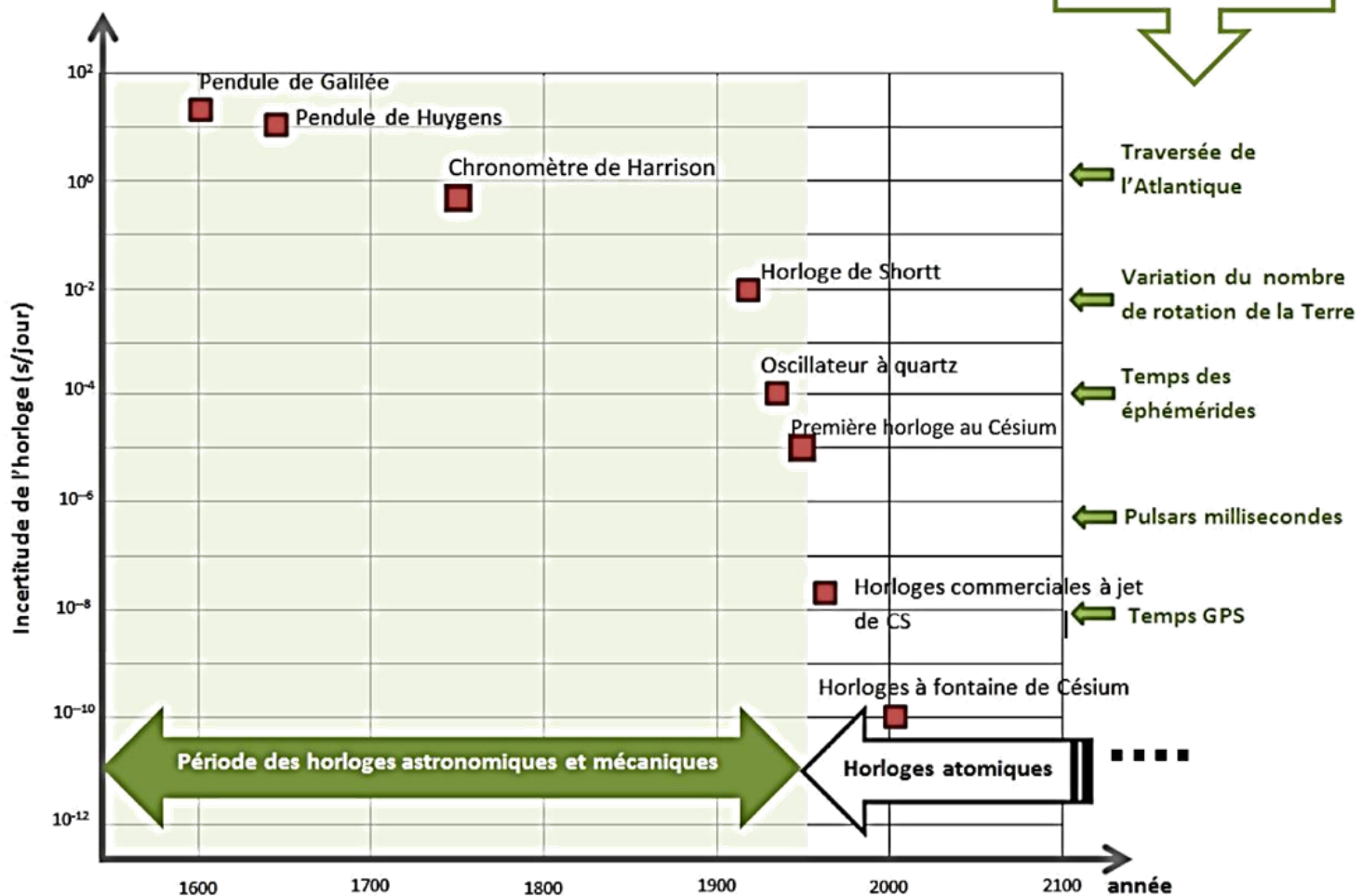
Les niveaux d'énergie correspondant à ces valeurs ne dépendent pas de la température (ou plus exactement très, très peu !). Les atomes sont universels : un atome de césium à Paris présentera exactement les mêmes propriétés qu'un atome de césium à New York ou à Tokyo. Ce n'est pas le cas des pendules ou des oscillateurs à quartz, difficiles à réaliser à l'identique.

Source : Pour la Science n° 397 novembre 2010

Auteur : Christophe Salomon

## Document 2 : L'horloge atomique

### Les progrès dans la mesure du temps



D'après un extrait du journal Science (novembre 2004 vol 306)

La première horloge à césium a été réalisée en Angleterre par Louis Essen et Jack Parry en 1955. Le principe est amélioré grâce à une méthode proposée par le physicien américain Norman Ramsey (qui lui vaudra le prix Nobel en 1989) : l'onde électromagnétique est produite par l'oscillateur à quartz...

...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 13e 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...

...L'amélioration des performances des horloges est spectaculaire: en un peu plus de quatre siècles, les meilleures horloges atomiques ont gagné 13 ordres de grandeur par rapport au pendule de Huygens et, sur les 50 dernières années, le gain est d'un facteur 10 tous les dix ans.

Source : Pour la Science n° 397 novembre 2010

## Document 3 : Les horloges atomiques : pour faire quoi ?

### Pour définir le temps international

Sans que nous en ayons conscience, les horloges atomiques terrestres rythment notre quotidien car elles déterminent le "*temps international*", celui qui sert de référence sur Terre.

Il permet de déterminer les fuseaux horaires, et par conséquent l'heure dans chaque zone géographique. On l'utilise aussi pour synchroniser les communications par satellites ou faire fonctionner le système de géolocalisation GPS.

Or ce "temps international" n'a pas été tiré aux dés... Il résulte d'une moyenne de plusieurs temps enregistrés par plus de trois cents horloges atomiques réparties sur le globe.

Ce système est considéré comme plus "démocratique" que l'ancien, où une horloge "mère" donnait quelque part dans le monde le temps de référence.



### Pour télécommander les sondes spatiales

Localiser les sondes spatiales qui voyagent aux confins du système solaire n'est pas aussi simple que lancer une recherche sur GoogleEarth.

Pour cela, la NASA est obligée de communiquer régulièrement avec les sondes, via le "deep space network", un réseau international d'antennes installées aux États-Unis, en Australie et en Espagne.

Pour réduire le temps de communication avec les sondes et ainsi, le temps d'utilisation du réseau d'antennes, la NASA développe une horloge atomique pesant moins d'un kilogramme !

L'horloge miniature sera embarquée dans les prochaines sondes de l'agence. Ainsi dotée, la sonde deviendra incollable sur le temps écoulé entre deux transmissions avec la Terre.

Avec cette donnée en plus, les ingénieurs calculeront plus vite la position de la sonde, économisant ainsi des échanges avec l'engin spatial.

### Pour la recherche fondamentale en cosmologie

Bizarrerie dans l'espace : en analysant le déplacement des sondes Pioneer 10 et 11, toujours en fonctionnement depuis leur lancement en 1972 et 1973, les ingénieurs de la NASA ont constaté que leur trajectoire s'écartait de plus en plus de celle calculée compte tenu de l'attraction des planètes du système solaire.

L'une des explications à cette épine dans le pied à la physique moderne est que la loi de la gravitation se comporte différemment à petite échelle (comme on peut l'observer sur notre planète) et à l'échelle du système solaire.

Dans un proche avenir, "on enverra des horloges atomiques autour du Soleil pour tester les lois de la gravitation à une autre échelle," promet Didier Massonnet, chef du projet Pharaon au CNES.

L'enjeu sera de vérifier si l'écoulement du temps est perturbé à proximité de l'astre de la même manière que sur Terre, ou bien s'il subit lui aussi une anomalie, tout comme les trajectoires des deux Pioneer... Et, éventuellement, de corriger en conséquence la théorie de la relativité.

### Pour prospecter du pétrole

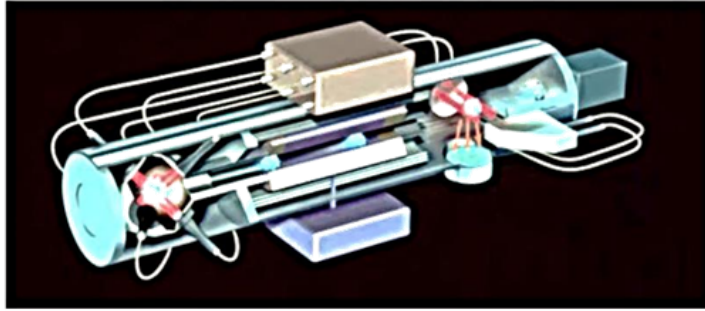
Dans l'Antiquité, on mesurait le temps qui passe en observant l'eau s'écouler dans un réservoir (principe de la clepsydre). Dans un futur proche, c'est l'inverse qui nous attend : on mesurera un niveau de liquide avec une horloge !

"À long terme, on disposera d'horloges sensibles à une différence du potentiel de gravité correspondant à une variation d'altitude de seulement un centimètre," prophétise Didier Massonnet.

On pourra donc "observer" sur une horloge atomique l'effet d'une baisse de nappe phréatique (réserve souterraine d'eau) due à une sécheresse, ou déceler la présence en profondeur de pétrole ou de minéraux, car ces phénomènes affectent localement la pesanteur terrestre. Les horloges atomiques seront devenues des baguettes de sourcier.

## Pharao remet les pendules à l'heure

À l'horizon 2013, un nouveau modèle d'horloge atomique sera embarqué à bord de l'ISS. Il permettra, notamment, de tester la théorie de la relativité d'Einstein.



### Une précision diabolique

Une précision accrue est souvent synonyme de découvertes en physique. D'où l'intérêt du projet Pharao, une horloge atomique ultraprécise qui sera mise en orbite en 2013, à bord de la station spatiale internationale (ISS). Elle pourra mesurer des décalages de 0,0000000001 seconde par jour.

Si l'on s'était servi de cette horloge pour mesurer le temps écoulé depuis le Big Bang, elle indiquerait l'âge correct de l'Univers à quelques dizaines de secondes près ! Pharao ne sera pas la première horloge atomique dans l'espace (de nombreux satellites ayant besoin de connaître le temps avec précision en sont équipés), mais elle sera indubitablement la plus exacte. En effet, elle ne perdra qu'une seconde toutes les 300 millions d'années. Une belle performance si on la compare aux horloges terrestres qui elles, perdent une seconde toutes les 50 millions d'années !

### Le secret ? Une horloge surgelée

Pharao signifie : projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite. En effet son nuage d'atomes sera refroidi à une température proche du zéro absolu (-273°C).

Qu'apporte le refroidissement ? En physique, la chaleur est synonyme d'agitation thermique. Donc, en refroidissant à l'extrême le nuage, on ralentit considérablement ses atomes. Ce qui facilite ensuite le décompte des vibrations de l'onde qu'ils émettent (leur "tic-tac").

L'horloge bénéficiera aussi de l'impesanteur qui siège dans l'ISS : délivré de la pesanteur terrestre, le nuage d'atomes sera en quelque sorte en lévitation dans sa boîte emplies d'ondes.

Les atomes restant donc plus longtemps dans la boîte, le capteur électronique chargé d'enregistrer le tic-tac aura d'autant plus de temps pour analyser l'onde électromagnétique.

Ces deux éléments (le refroidissement et l'impesanteur) expliquent l'incroyable précision de l'horloge.

## À l'assaut de la théorie de la relativité

Pharao est un instrument de recherche fondamentale. Il permettra notamment aux physiciens qui l'ont imaginé de tester si, comme le prévoit la théorie de la relativité, l'écoulement du temps est influencé par la gravité.

D'après cette théorie, le temps ralentit à proximité de toute masse. Autrement dit, le temps s'écoule plus lentement à la surface de la Terre que dans l'espace.

Ce phénomène a déjà été observé dans l'expérience de Hafele et Keating. L'horloge atomique Pharao va en affiner les résultats. En fonction de ces mesures, il n'est pas impossible que les physiciens aient besoin de compléter la théorie de la relativité !

D'après <http://www.cnes-jeunes.fr/web/CNES-Jeunes-fr/8444-les-horloges-atomiques-pour-faire-quoi-.php>

## Questions

- 1- De quels paramètres dépend la période du pendule de Galilée ? Quels sont les inconvénients d'un tel pendule ?
- 2- En utilisant les documents ci-dessus, rédiger un commentaire argumenté permettant de répondre aux questions suivantes :
  - Comment peut-on définir de manière générale une horloge ?
  - Que peut-on dire de l'évolution des horloges depuis Galilée ? (*Influences scientifiques et sociétales*).
  - Comment expliquer l'intérêt de mesurer le temps avec des atomes ?

## Une seconde pour « tuer le temps »

### Document 1 : La seconde au XVII<sup>e</sup> siècle - Galilée et les pendules



[http://astronomie.chezjules.over-blog.com/pages/Activites\\_en\\_italien-2042113.html](http://astronomie.chezjules.over-blog.com/pages/Activites_en_italien-2042113.html)

À l'âge de dix-neuf ans, Galilée découvre, en chronométrant à l'aide de son pouls, la régularité des oscillations des lustres se balançant sous la voûte de la cathédrale de Pise. De retour chez lui, il compare les petites oscillations de deux pendules et travaille à la loi de l'isochronisme des pendules : la durée d'un aller-retour ne dépend que de la longueur du pendule.

### Document 2 : La seconde au début du XX<sup>e</sup> siècle - Les horloges à quartz

Aussi impressionnantes fussent-elles, les horloges de Shortt à balancier furent détrônées par un type complètement nouveau de « garde-temps », les horloges à quartz.

Sur la Terre, le quartz, principalement du dioxyde de silicium, est le second minéral par son abondance : c'est un constituant essentiel de nombreux sables et roches.

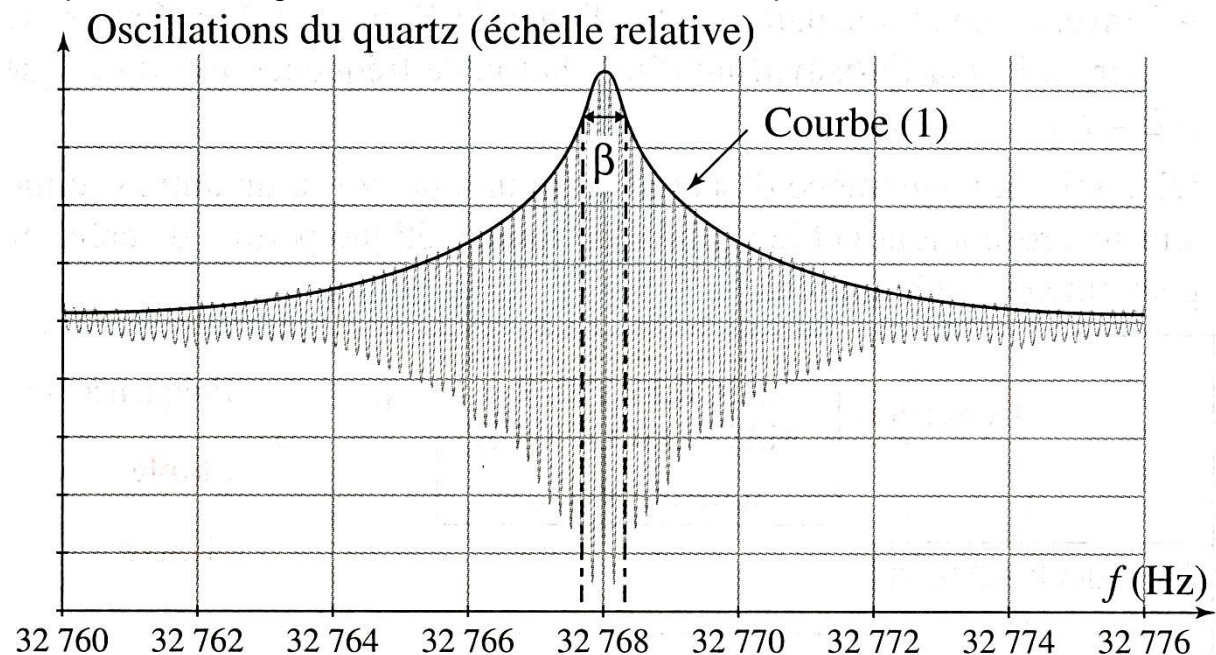
Quand il est pur, il se présente sous la forme de cristaux transparents d'aspect vitreux.



Le principe des oscillateurs à quartz n'est pas plus compliqué que celui d'une cloche. Quand on la heurte, une cloche sonne avec une note de musique bien précise. Cette note dépend de la forme et de la taille de la cloche, ainsi que du matériau qui la compose. Les oscillateurs à quartz comportent un cristal de quartz vibrant qui fournit une note de musique de très haute fréquence, en général inaudible, car elle se situe dans le domaine des ultrasons. La fréquence de cette note dépend de la forme et de la taille de la fine tranche de cristal de quartz utilisée, et elle est extrêmement stable. Ce sont les propriétés « piézoélectriques » du quartz qui le rendent si adapté à être utilisé comme pendule. Quand on comprime un cristal de quartz, une tension électrique apparaît entre ses faces. À l'inverse, si l'on soumet ses faces à une tension électrique, le cristal se contracte ou se dilate. Ainsi, un cristal de quartz qui vibre à une certaine fréquence produit un signal électrique qui a exactement la même fréquence. Ce signal peut être redirigé sur le cristal pour le contraindre à osciller. Un tel oscillateur à cristal est donc constitué d'un cristal qui vibre comme une cloche, et d'un circuit électrique qui vibre en cadence avec lui : on dit que le quartz entre en

**résonance** avec le circuit électrique. L'amplitude de l'oscillation est alors maximale (voir figure). La largeur (en fréquence)  $\beta$  est appelée bande passante.

Dans les horloges ou les montres à quartz modernes, la fréquence la plus souvent retenue est de 32 768 Hz (32 768 oscillations par seconde). Ce choix n'est pas dû au hasard. En divisant quinze fois par deux cette fréquence, à l'aide de circuits électroniques, on obtient une fréquence d'un coup par seconde. Les premières horloges à cristal apparurent en 1927 et, à la fin des années 1930, elles avaient remplacé les horloges de Shortt comme étalon de fréquence dans les laboratoires.



Aujourd'hui, les horloges à quartz sont omniprésentes. Toutes les montres à pile, les réveils fixes ou de voyage ont des oscillateurs à quartz. Certaines sont si précises qu'elles n'ont pas besoin d'être réglées entre deux échanges de pile. Bien que les horloges à quartz aient été dépassées par les horloges atomiques pour les applications nécessitant la plus grande précision, elles constituent un maillon essentiel pour la conservation d'une heure précise.

Tony Jones, *Combien dure une seconde*, EDP Science

### Document 3 : La seconde « atomique » - Les horloges atomiques

Une horloge atomique est une horloge qui utilise la pérennité et l'immuabilité de la fréquence du rayonnement électromagnétique émis par un électron lors du passage d'un niveau d'énergie à un autre pour assurer l'exactitude et la stabilité du signal oscillant qu'elle produit. Un de leurs principaux usages est le maintien du Temps atomique international (TAI) et la distribution du Temps universel coordonné (UTC), qui sont les échelles de temps de référence.

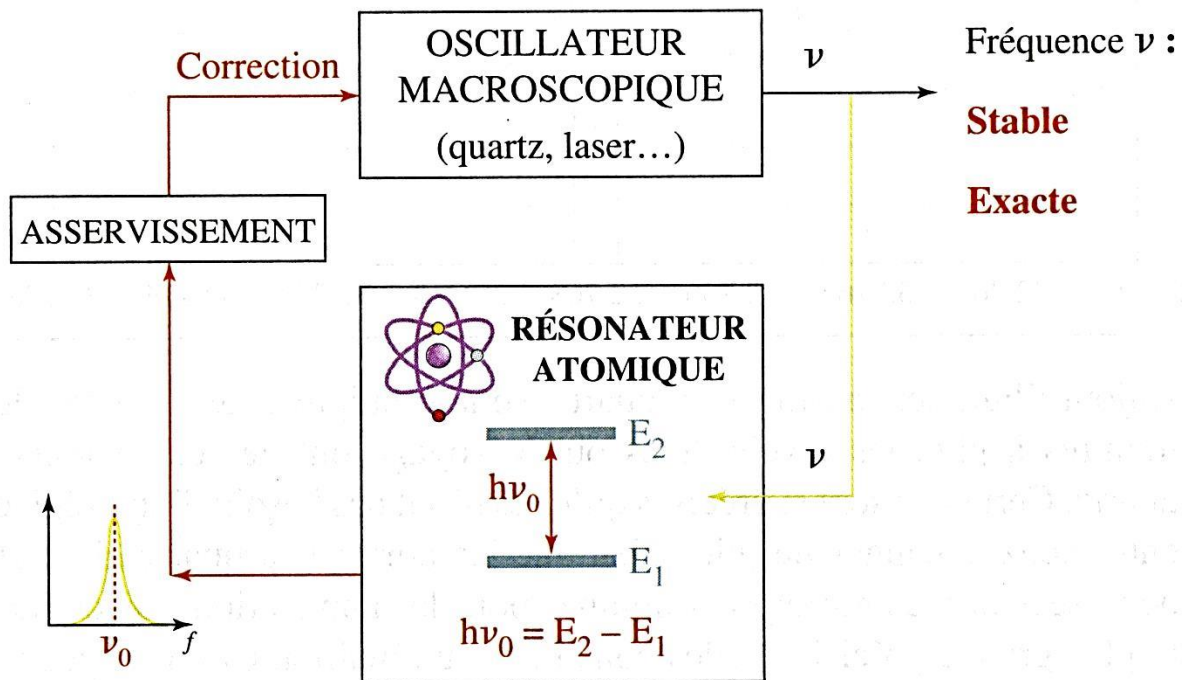
#### Processus énergétiques atomiques

Un atome passant d'un état d'énergie excité  $E_2$  à un autre état d'énergie  $E_1$  plus faible (tel que  $E_2 > E_1$  et  $\Delta E = E_2 - E_1$ ) émet un photon de fréquence  $\nu$  telle que :

$\nu = \Delta E / h$  avec  $h = 6,62 \times 10^{-34}$  J.s la constante de Planck. C'est le processus d'émission spontanée.

À l'inverse, un atome dans un état d'énergie  $E_1$  passera à un état excité d'énergie  $E_2$  par l'absorption d'un photon de fréquence  $\nu$  et d'énergie  $\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu$ .

Ici aussi, un phénomène d'accord entre un quartz (ou un autre oscillateur macroscopique) et le signal électromagnétique permet de créer un phénomène de résonance.



D'après les publications de Noël Dimarcq, directeur de recherche au CNRS.

## Questions

### Partie I : La seconde au XVII<sup>e</sup> siècle

1. Schématiser un pendule à l'équilibre et représenter les forces appliquées.
2. Que peut-on dire concernant ces forces à l'équilibre ? Justifier.
3. À quelles conditions les oscillations du pendule simple sont-elles isochrones ?
4. Pour un amortissement faible, la pseudo-période d'un pendule simple est voisine de la période propre dont l'expression est :

$$T_0 = 2 \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Avec  $g$  l'accélération de la pesanteur ( $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

Que représente la grandeur «  $l$  » dans l'expression de la période propre du pendule ?

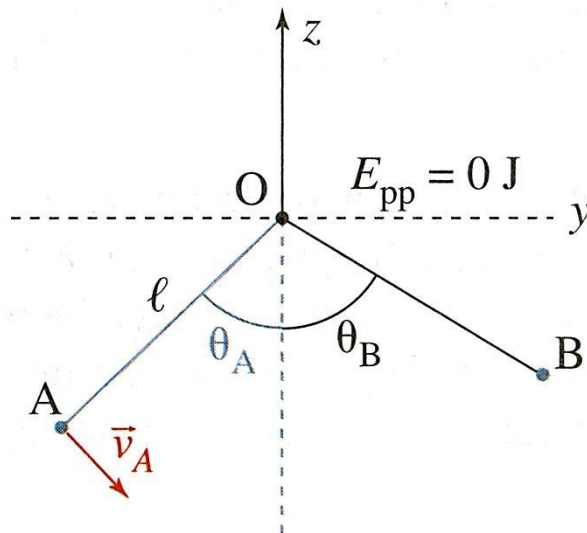
5. Des élèves d'une classe de terminale S procèdent à une série de mesures. Le protocole donné par le professeur est le suivant : « Écarter le pendule de sa position d'équilibre et faire osciller le pendule avec une amplitude initiale égale ou inférieure à  $20^\circ$  et sans vitesse initiale. À l'aide d'un chronomètre, mesurer la durée  $\Delta t$  de 10 oscillations, c'est-à-dire de 10 allers et retours ».

Les résultats expérimentaux donnent :

$l$ (m)	$45 \times 10^{-2}$	$30 \times 10^{-2}$	$20 \times 10^{-2}$	$10 \times 10^{-2}$
$\Delta t$ (s)	13,4	11,0	9,0	6,4

- a. Expliquer pourquoi il est préférable de mesurer 10 oscillations et non pas une seule.
- b. On préconise aussi fréquemment de réaliser pour chaque longueur au moins trois mesures et de prendre la moyenne. Pourquoi ?
- c. Tracer, sur une feuille de papier millimétré, la courbe  $T_0 = f(\sqrt{l})$  en utilisant les échelles suivantes : 2 cm pour  $0,050 \text{ m}^{1/2}$  et 1 cm pour 0,10 s.
- d. À partir de la courbe obtenue, montrer que l'expression théorique de la période propre d'un pendule simple est vérifiée.
6. Pour mesurer le temps, on utilise un pendule qui « bat la seconde », c'est-à-dire qu'un aller dure une seconde. Quelle doit être la longueur du pendule utilisé ?

7. L'un des élèves réitère l'expérience précédente en écartant un pendule de longueur  $\ell = 20 \text{ cm}$  de  $\theta_A = 20^\circ$  mais en lui communiquant une vitesse initiale  $V_A = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$  (voir ci-après).



Il atteint alors le point **B** avec une vitesse nulle. Les frottements seront supposés négligeables.

- Établir les expressions des altitudes  $z_A$  et  $z_B$  en **A** et **B** dans le repère  $(Oz)$  en fonction de  $\ell$ ,  $\theta_A$  et  $\theta_B$ .
- En déduire les expressions des énergies potentielles de pesanteur du pendule en **A** et en **B**, le niveau de référence étant placé en **O**.
- Donner les expressions des énergies mécaniques du pendule en **A** et **B**.
- En déduire l'expression de l'angle maximum  $\theta_B$  atteint par le pendule. Calculer sa valeur.

## Partie II : La seconde au début du XX<sup>e</sup> siècle

L'avènement des semi-conducteurs et des circuits intégrés, dans les années 1950, a permis la miniaturisation des horloges à quartz.

- Il est possible, en utilisant un dispositif approprié, d'étudier les oscillations du quartz en fonction de la fréquence imposée par l'oscillateur électrique. On obtient le graphique du **document 2**, sur lequel est indiquée la grandeur  $\beta$ , appelée largeur de la bande passante.
  - Quel est le phénomène physique illustré par cette courbe du **document 2**?
  - À l'aide de la figure du **document 2**, déterminer la fréquence propre  $f_0$  d'oscillations du quartz.
  - Le facteur de qualité d'un oscillateur, noté  $Q$ , est défini par :  $Q = \frac{f_0}{\beta}$ . Il permet de caractériser l'amortissement des oscillations :
    - si  $Q$  est grand devant 1 ( $Q > 10$ ), alors la courbe de résonance est pointue et l'amortissement est considéré comme faible ;
    - si  $Q$  est de l'ordre de l'unité ou inférieur à 1, alors la courbe de résonance est aplatie et l'amortissement est considéré comme fort.
 Calculer  $Q$ , puis indiquer si l'amortissement est faible ou fort pour la figure du **document 2**.
- Un dispositif appelé « diviseur de fréquence », placé après le quartz, permet d'obtenir un signal de fréquence égale à 1 Hz cadencant un petit moteur animant la trotteuse d'une montre (aiguille indiquant les secondes). La fréquence  $f_0$  est alors divisée par  $2^n$ , où  $n$  est un entier positif. Déterminer  $n$  pour obtenir un signal de fréquence égale à 1 Hz.

## Partie III : La seconde « atomique »



Depuis 1968, 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, au repos et à 0 K ».

1. Un atome passant d'un état d'énergie excité  $E_p$  à un autre état d'énergie plus faible  $E_n$  émet un photon de fréquence  $\nu$ . Donner la relation entre les énergies  $E_p$ ,  $E_n$  et la fréquence  $\nu$ .
2. Donner la valeur de la fréquence  $\nu$  correspondant à la transition électronique définissant la seconde.
3. Calculer la variation d'énergie  $E_p - E_n$  correspondant à la valeur de  $\nu$  obtenue à la question précédente. Exprimer le résultat en joules et en électronvolts.

**Données :** Constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s ;  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$  J

4. L'incertitude d'une horloge atomique à « fontaine » de césium est de  $5 \times 10^{-16}$  s. Dans quel domaine d'application a-t-on besoin d'une telle précision ?

## L'expérience de Michelson et Morley

### Document 1 : Rappel historique

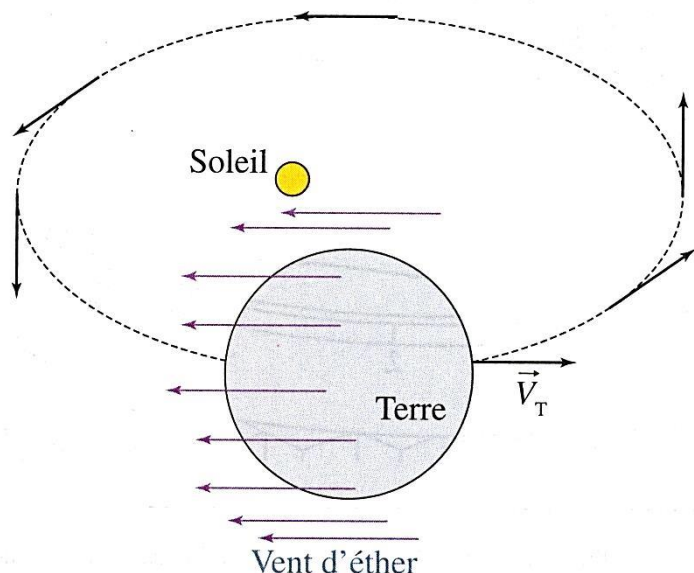
Jusqu'au début du  $xx^e$  siècle, la communauté scientifique s'accordait à dire qu'une onde ne pouvait se propager que dans un milieu capable de vibrer. Comme à l'époque, le caractère ondulatoire de la lumière était prouvé, et que celle-ci peut se propager dans le vide, on supposa alors naturellement que le vide devait être en fait une substance immobile dont les vibrations définiraient la lumière. Cette substance fut baptisée par Christian Huygens « éther luminifère ». Une des conséquences de l'existence de l'éther était que la vitesse de la lumière varie en fonction de la direction de sa propagation.

C'est dans ce contexte qu'Albert Michelson confectionna en 1881 l'interféromètre, qui porte aujourd'hui son nom. À l'aide d'Edward Morley, il réalisa une expérience et tenta pendant six ans, en vain, de mettre en évidence la vitesse de la Terre par rapport à l'éther. Cette expérience, à travers son résultat négatif, mit en valeur le caractère constant de la vitesse de la lumière.

Cet exercice illustre l'expérience de Michelson et Morley, qui marqua l'histoire de la physique et valut à Michelson le prix Nobel de physique en 1907.

### Document 2 : Le vent d'éther

On suppose l'existence de l'éther considéré comme référentiel fixe (référentiel absolu). On note  $c$  la vitesse de la lumière dans ce référentiel. On note  $\vec{V}_T$  la vitesse de la Terre (prise comme référentiel relatif) par rapport à l'éther.



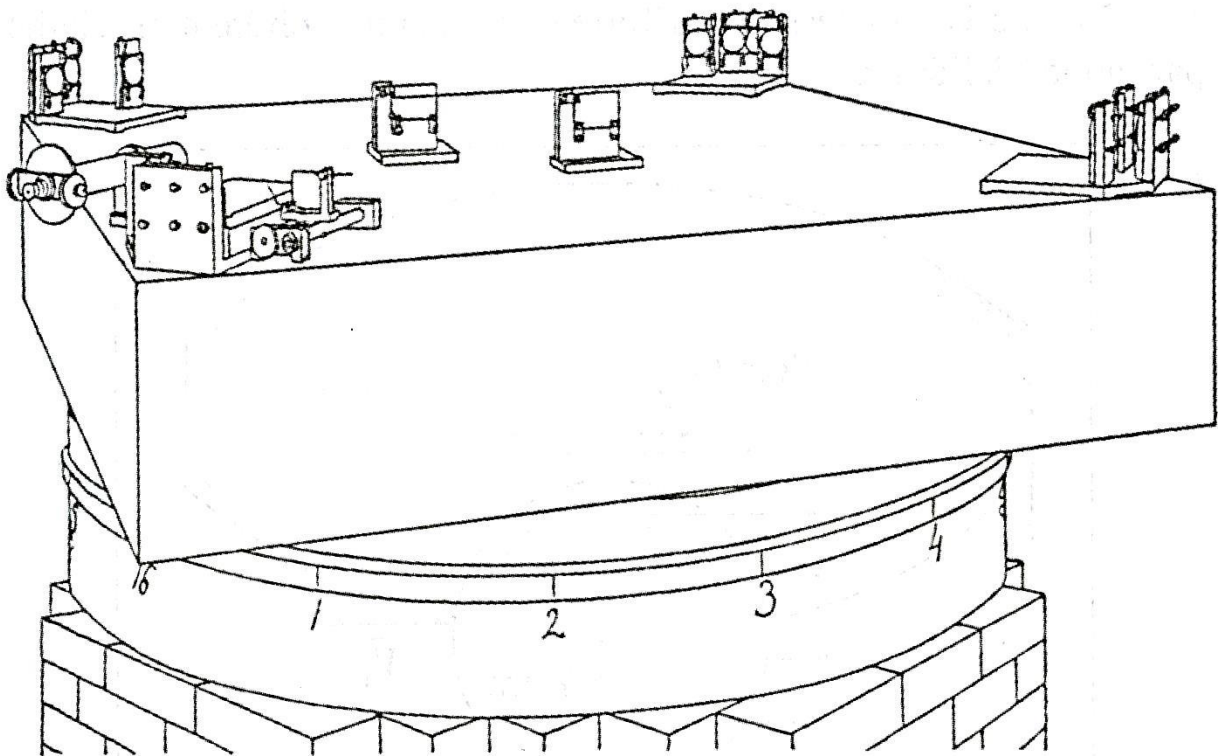
### Document 3 : Composition galiléenne des vitesses

Soit un référentiel absolu  $R$ . Soit un référentiel relatif  $R'$  en mouvement par rapport à  $R$ .

Si on appelle :

- $\vec{V}_R$  la vitesse d'un corps dans le référentiel absolu  $R$  ;
- $\vec{V}_{R'}$  la vitesse du même corps dans le référentiel relatif  $R'$  ;
- $\vec{V}_{R'/R}$  la vitesse du référentiel relatif  $R'$  par rapport au référentiel absolu  $R$  (aussi appelée vitesse d'entraînement), la composition galiléenne des vitesses s'écrit :  $\vec{V}_R = \vec{V}_{R'} + \vec{V}_{R'/R}$

### Document 4 : Schéma de l'interféromètre

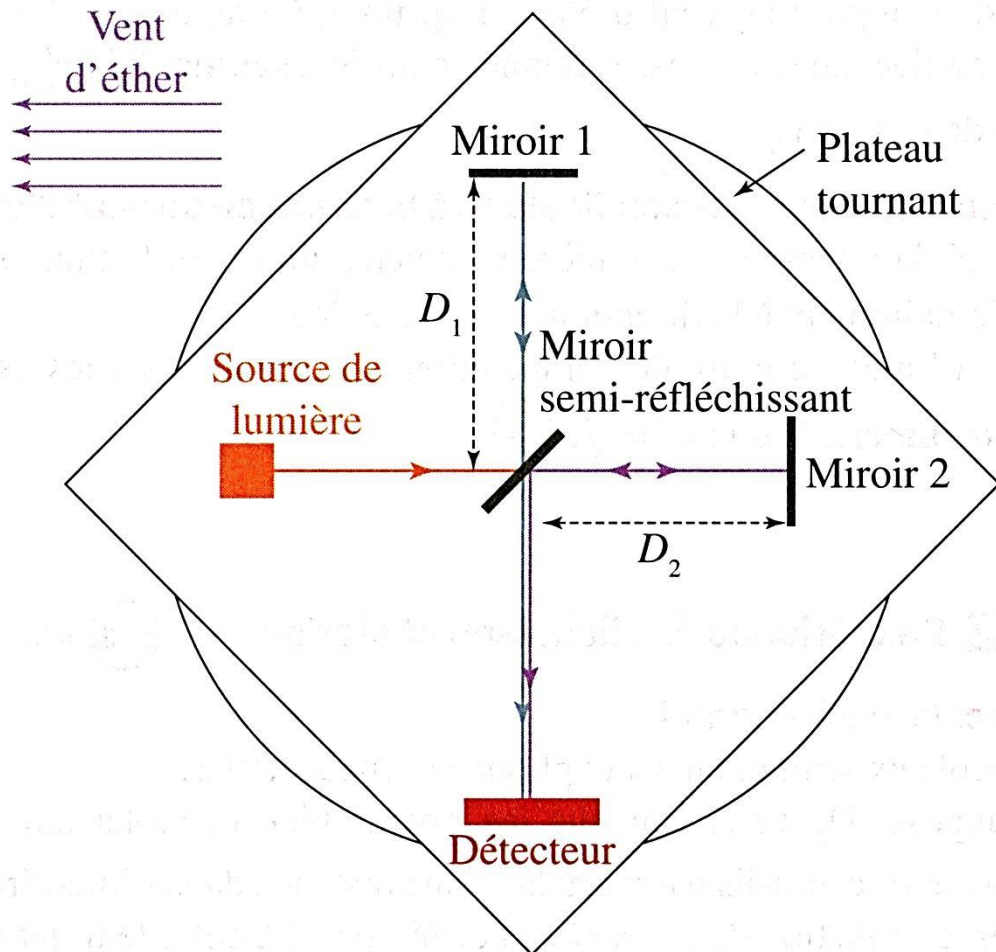


Publié dans *The American Journal of Science*, n° 203, novembre 1887

### Document 5 : Principe de fonctionnement de l'interféromètre

L'interféromètre a été construit dans le but de mesurer la différence de vitesse entre deux rayons lumineux envoyés dans des directions différentes par rapport au vent d'éther. Une source lumineuse envoie un rayon (orange) qui passe par un miroir semi-réfléchissant. Ce miroir a la propriété de réfléchir la moitié du faisceau et d'en laisser passer l'autre moitié. Il est tourné à  $45^\circ$  pour générer deux faisceaux perpendiculaires (bleu et violet). Ces deux faisceaux suivent un parcours différent dans l'interféromètre, avant de se recombiner sur le détecteur. L'interféromètre est disposé sur un plateau tournant.

Afin de montrer l'existence de l'éther, Michelson se base sur la propriété des ondes à interférer. Si les rayons bleu et violet n'arrivent pas précisément au même moment au niveau du détecteur, alors on observera des franges d'interférences (l'écran comportera des zones éclairées et des zones sombres). Si les rayons arrivent précisément au même moment, on observera un écran uniformément éclairé.



**Document 6 : Relations mathématiques utiles**

Pour  $x \ll 1$ , on a les deux relations suivantes :

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} \approx 1 + \frac{1}{2}x \quad \frac{1}{1-x} \approx 1+x$$

**Questions**

**Partie I : L'éther : un milieu mystérieux**

**1. Vitesse d'un rayon dans la direction du vent d'éther**

Soit un rayon lumineux envoyé parallèlement à la direction du vecteur  $\vec{V}_T$  défini sur le document 2.

- Soit  $c'_2$  même sens la vitesse de la lumière associée à un rayon se propageant dans le même sens que le vent d'éther. Exprimer, à l'aide de la loi de composition galiléenne des vitesses donnée dans le document 3,  $c'_2$  même sens en fonction de  $c$  et de  $V_T$ .
- Soit  $c'_2$  sens opposé la vitesse de la lumière associée à un rayon se propageant dans le sens opposé au vent d'éther. Exprimer, à l'aide de la loi de composition galiléenne des vitesses donnée dans le document 3,  $c'_2$  sens opposé en fonction de  $c$  et de  $V_T$ .

**2. Vitesse d'un rayon perpendiculaire à la direction du vent d'éther**

On note  $c'_1$  la vitesse de la lumière associée à un rayon lumineux envoyé perpendiculairement à la direction du vecteur  $\vec{V}_T$ .

Montrer, à l'aide de la loi de composition galiléenne des vitesses donnée dans le document 3, que  $c'_1 = \sqrt{c^2 - V_T^2}$ .

## Partie II : L'expérience de Michelson et Morley

### 1. Protocole expérimental

Le protocole expérimental est expliqué au **document 5**.

- On suppose  $D_2 < D_1$ . Lorsque les rayons bleu et violet atteignent le détecteur, ceux-ci ont-ils parcouru la même distance dans l'interféromètre ?  
Exprimer, en fonction de  $D_1$  et  $D_2$ , la différence  $\Delta L$  entre le trajet du rayon bleu et celui du rayon violet.
- Dans le protocole expérimental proposé par Michelson et Morley, on prend  $D_1 = D_2 = D$ . Quelle est alors la différence de trajet entre les deux rayons ?
- En déduire ce que l'on devrait observer sur le détecteur :
  - si la vitesse de la lumière est identique pour les rayons bleu et violet ;
  - si la vitesse de la lumière est différente pour les rayons bleu et violet.
- En prenant  $D_1 = D_2 = D$ , Michelson et Morley observèrent une figure d'interférence. Quelle est l'origine réelle de l'apparition de franges ?

Pour conclure définitivement, Michelson et Morley proposent alors le protocole expérimental suivant : on place l'interféromètre de telle sorte que le rayon violet soit dans la direction du vent d'éther. On observe alors un système de franges sur le détecteur. Puis, on fait tourner l'appareil d'un quart de tour pour intervertir les deux trajets.

### 2. Les résultats attendus par Michelson et Morley

On se place dans la configuration du schéma du **document 5**, et on considère que l'on a rigoureusement  $D_1 = D_2 = D$ .

- Exprimer en fonction de  $D$ ,  $c$  et  $V_T$  le temps  $T_{2A}$  mis par le rayon violet pour parcourir le trajet aller entre le miroir semi-réfléchissant et le miroir 2.  
Exprimer en fonction de  $D$ ,  $c$  et  $V_T$  le temps  $T_{2R}$  mis par le rayon violet pour revenir sur le miroir semi-réfléchissant après réflexion sur le miroir 2 (trajet retour).
- On pose  $\beta = V_T / c$ . Déduire de la question précédente le temps  $T_2$  nécessaire à un aller-retour « miroir semi-réfléchissant-miroir 2 » en fonction de  $D$ ,  $c$  et  $\beta$ .  
Montrer, en utilisant le **document 6**, qu'au deuxième ordre  $\beta$ , cette expression se simplifie en :

$$T_2 = \left(2 \frac{D}{c}\right) \cdot (1 + \beta^2)$$

- Exprimer en fonction de  $D$ ,  $c$  et  $V_T$  le temps  $T_{1A}$ , mis par le rayon bleu pour parcourir le trajet aller entre le miroir semi-réfléchissant et le miroir 1.  
Exprimer en fonction de  $D$ ,  $c$  et  $V_T$  le temps  $T_{1R}$  mis par le rayon bleu pour revenir sur le miroir semi-réfléchissant après réflexion sur le miroir 1 (trajet retour).
- Déduire de la question précédente le temps  $T_1$  nécessaire à un aller-retour « miroir semi-réfléchissant-miroir 1 » en fonction de  $D$ ,  $c$  et  $\beta$ .  
Montrer, en utilisant le **document 6**, qu'au deuxième ordre  $\beta$ , cette expression se simplifie en :

$$T_1 = \left(2 \frac{D}{c}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \beta^2\right)$$

- En déduire l'expression du retard  $\Delta T = T_2 - T_1$  entre le rayon violet et le rayon bleu.
- Lequel du rayon bleu ou violet arrive en premier sur le détecteur ?

On tourne maintenant l'interféromètre de  $90^\circ$  par rapport au vent d'éther.

- g. Exprimer, en fonction de  $\Delta T$ , l'expression du retard  $\Delta T'$  entre le rayon violet et le rayon bleu dans la nouvelle configuration. Commenter le signe de  $\Delta T'$ . Lequel du rayon bleu ou violet arrive en premier sur le détecteur ?
- h. Michelson et Morley, après calculs, prédirent que, si leur théorie du mouvement de la Terre par rapport à l'éther était vérifiée, alors en tournant l'interféromètre de  $90^\circ$ , on observerait une modification de la figure d'interférence de telle sorte qu'une zone sombre devait devenir brillante, et vice versa. Après six ans d'expérience, Michelson et Morley durent se rendre à l'évidence : aucun décalage n'était visible. Conclure sur le résultat de cette expérience. Que peut-on en déduire pour la vitesse réelle des rayons bleu et violet ?

### Partie III : Une expérience clé pour la relativité restreinte

1. Énoncer les deux postulats de la relativité restreinte.
2. Par quel physicien et au cours de quel siècle ont-ils été énoncés ?
3. Lequel des deux postulats l'expérience de Michelson et Morley illustre-t-elle ?

**« Ô, temps ! Suspend ton vol » ...**

#### Document 1 : Événements et temps

« Il convient [...] de noter que tous nos jugements dans lesquels le temps joue un rôle sont toujours des jugements sur des événements simultanés. Quand je dis, par exemple, "le train arrive ici à 7 h", cela veut dire que "le passage de la petite aiguille de ma montre par l'endroit marqué 7 et l'arrivée du train sont des événements simultanés". [...] »

« Ce qui est essentiel, c'est de définir le temps au moyen d'horloges au repos dans un système au repos ; à cause de cette relation étroite avec le système au repos, nous appellerons le temps que nous venons de définir "**temps du système au repos**". »

Partie 1, Chap. 1

Albert Einstein, *Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité*, coll. « *Discours de la méthode* », Gauthier-Villard (première parution en 1905).

#### Document 2 : Relativité du temps

« Nous constatons ainsi qu'il ne faut pas attribuer à la notion de simultanéité une signification absolue, mais que deux événements, qui, vus d'un système de coordonnées, sont simultanés, ne le sont plus quand on les observe d'un système en mouvement par rapport au premier. »

Partie 1, Chap. 2

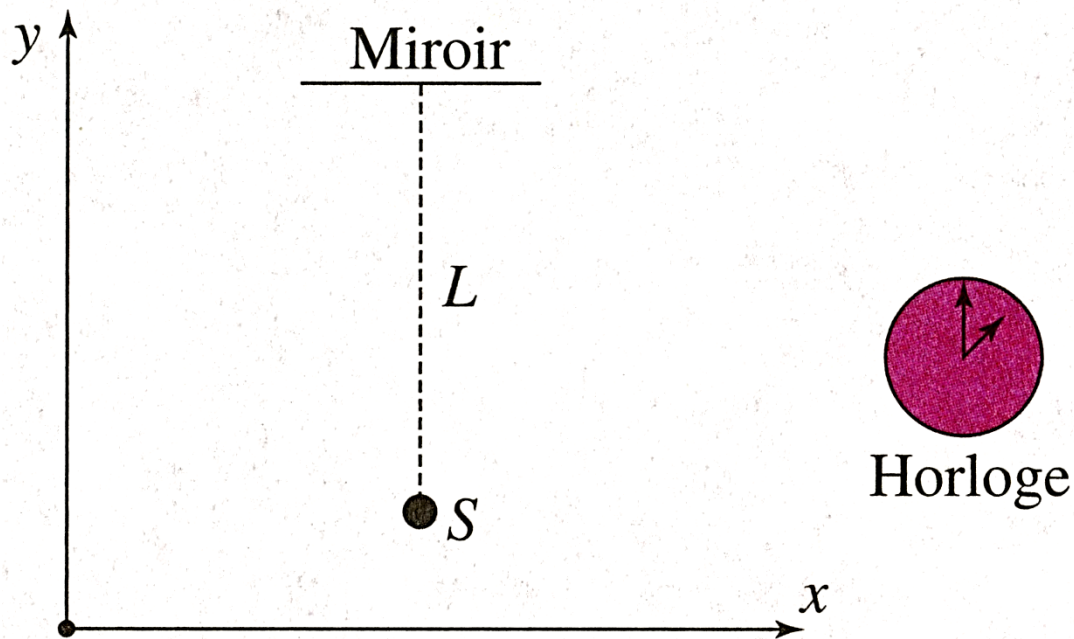
« Si aux points **A** et **B** [d'un référentiel] **K** se trouvent des horloges au repos [...] dont la marche est synchrone, et si l'on déplace l'horloge en **A** avec la vitesse **v** le long de la ligne qui la relie à **B**, on constate qu'après son arrivée en **B**, les deux horloges ne sont plus synchrones. »

Partie 1, Chap. 4

Albert Einstein, *Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité*, coll. « *Discours de la méthode* », Gauthier-Villard (première parution en 1905).

#### Document 3 : Expérience de pensée : dilatation du temps

On dispose d'une horloge, d'une source lumineuse S et d'un miroir M. Soit  $R$  le référentiel galiléen par rapport auquel l'horloge, la source lumineuse et le miroir sont fixes. Soit  $(O; \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$  un repère fixe par rapport à  $R$ . On a  $\vec{SM} = L \vec{u}_y$ . Soit  $R'$  un référentiel en translation uniforme par rapport à  $R$  à la vitesse  $\vec{v} = v \vec{u}_x$ .



Considérons deux événements :

- événement A : émission d'un éclair ;
- événement B : réception de l'éclair après réflexion sur le miroir M. Un premier observateur lié au référentiel  $R$  mesure un intervalle de temps  $\Delta t$  entre ces deux événements. Un second observateur lié au référentiel  $R'$  mesure sur une horloge liée à  $R'$  un intervalle de temps  $\Delta t' \neq \Delta t$  entre ces deux événements.

#### Document 4 : Le muon

Le muon (ou  $\mu$ ) est une particule élémentaire, qui appartient, comme l'électron, à la famille des leptons : il porte une charge élémentaire (il y a des  $\mu^+$  et des  $\mu^-$ ), et sa masse est 207 fois la masse de l'électron. C'est une particule instable : il se désintègre au bout d'un temps  $\tau = 2,20 \times 10^{-6}$  s, appelé « durée de vie », selon le mode de désintégration suivant :



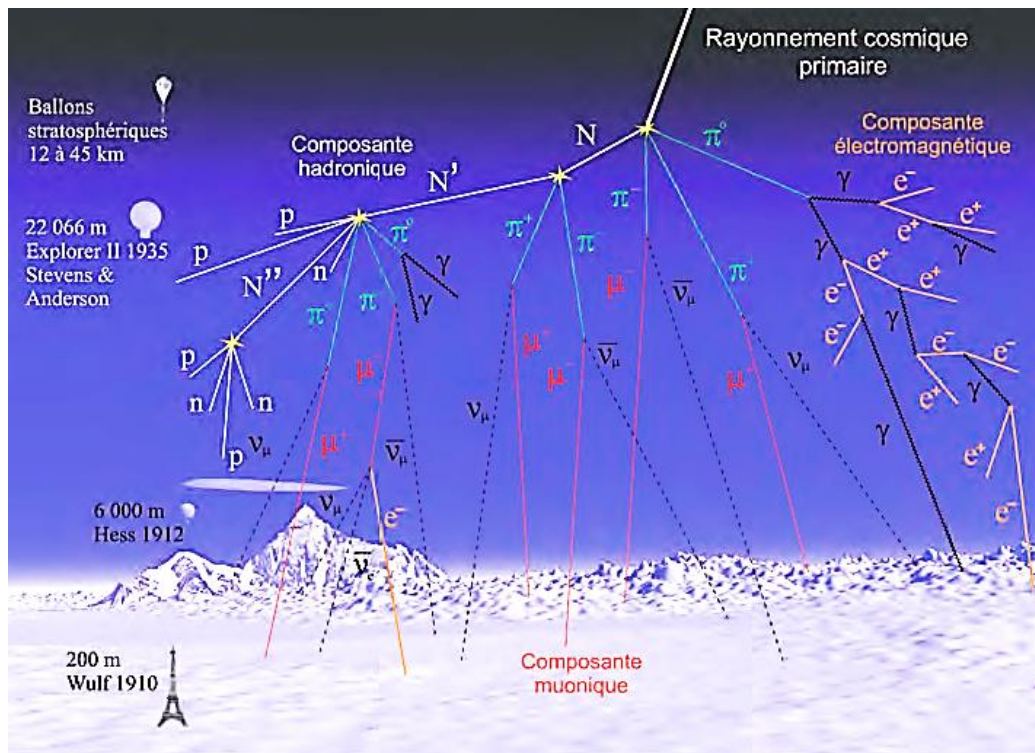
Les muons, au repos, se désintègrent suivant la loi :

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

Avec  $N$  le nombre de muons à l'instant  $t$ ,  $N_0$  le nombre de muons à l'instant  $t = 0$ ,  $\tau$  la durée de vie d'un muon (lorsqu'il est au repos) et  $t$  le temps lu sur une horloge liée au référentiel dans lequel le muon est au repos.

Yvan Simon, *Relativité restreinte - Cours et applications*, © Vuibert.

#### Document 5 : Une gerbe cosmique



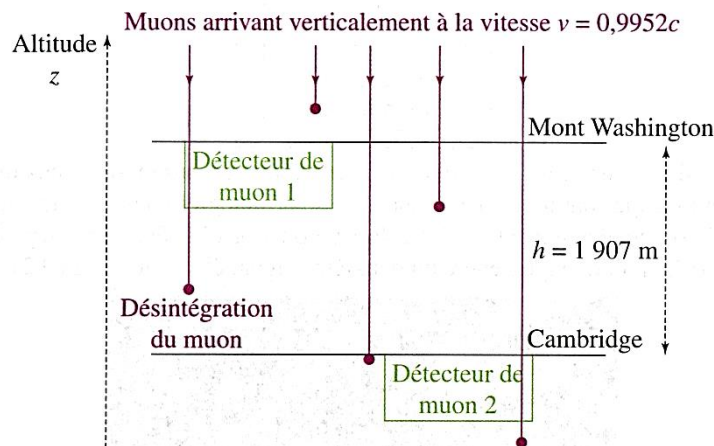
© Christophe LAGOUTE

Les muons nous arrivent verticalement depuis la haute atmosphère avec des vitesses voisines de la vitesse de la lumière ( $v = 0,9952 c$ ). Ils ont été formés dans des réactions nucléaires elles-mêmes provoquées par un rayonnement cosmique primaire.

Christophe Lagoute, « Réalisation d'un détecteur de muons : une approche de physique du xx<sup>e</sup> siècle au lycée », BUP, n° 911.

**Document 6 : Expérience de D. Frisch et J. Smith [1963]**

En 1963, David H. Frisch et James H. Smith ont étudié la durée de vie des muons du rayonnement cosmique. Pour cela, ils ont placé deux détecteurs de muons (scintillateurs) à deux altitudes différentes.



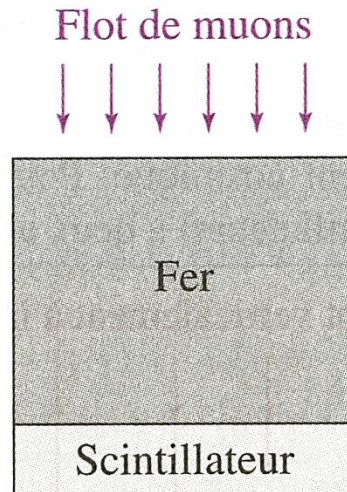
D. Frisch et J. Smith ont comptabilisé le nombre de muons entrant dans les deux détecteurs pendant une heure. Leurs résultats expérimentaux sont les suivants :

Essai numéro	Mont Washington Nombre de muons détectés en une heure	Cambridge Nombre de muons détectés en une heure
1	568	412
2	554	403
3	582	436
4	527	395
5	588	393

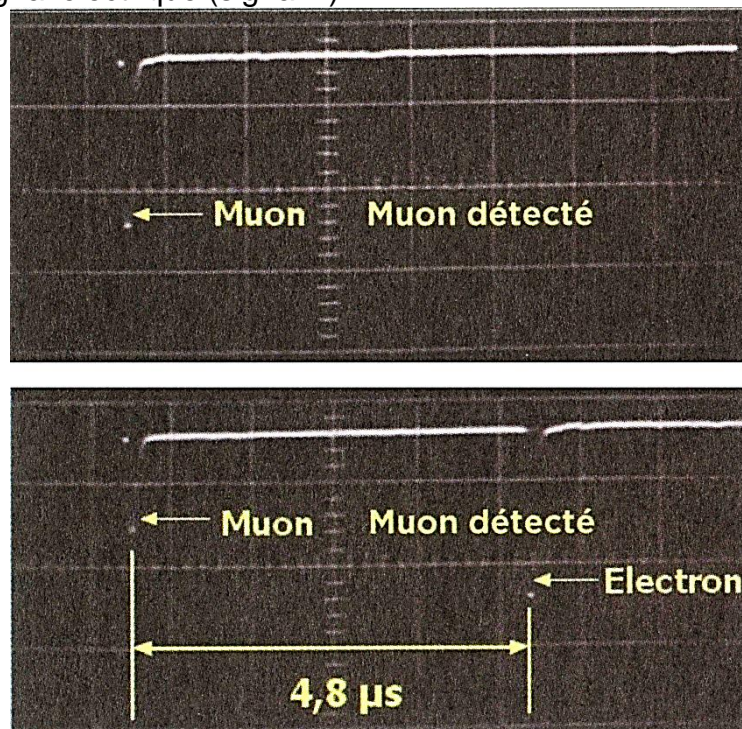
**Document 7** : Principe des détecteurs de particules utilisés par Frisch et Smith

Considérons un flot de muons arrivant verticalement. Ces muons traversent un scintillateur recouvert d'une épaisseur de 75 cm de fer.

L'arrivée d'un muon sur le scintillateur se traduit par un très court éclair lumineux qui génère un signal électrique (signal 1).



Si l'épaisseur de fer est suffisante pour arrêter certains muons, ceux qui sont stoppés ont toutes les chances de se désintégrer dans les quelques microsecondes suivantes : il y a alors production d'un électron (ou positon) énergétique qui génère un deuxième signal électrique (signal 2).



D.M. Frisch, J.H. Smith

David H. Frisch et James H. Smith, « *Mesurement of the relativistic time dilatation using  $\mu$ .Mesons* », article original du 14 janvier 1963.

**Document 8** : Valeur moyenne et écart-type

Soit une distribution équiprobable de valeurs ( $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ ). La valeur moyenne de cette distribution est donnée par :



$$\langle x \rangle = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n}$$

L'écart-type de cette distribution est donné par :

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot [(x_1 - \langle x \rangle)^2 + (x_2 - \langle x \rangle)^2 + \dots + (x_n - \langle x \rangle)^2]}$$

**Document 9 : Incertitudes, intervalle de confiance et niveau de confiance**

On réalise une mesure de  $X$  avec un appareil de mesure. On réalise la mesure  $n$  fois de suite ( $n > 3$ ) avec le même appareil.

Soit  $\langle X \rangle$  la valeur moyenne des  $n$  mesures, et  $E$  l'écart-type associé.

Alors, en choisissant l'intervalle de confiance  $[\langle X \rangle - 2 E, \langle X \rangle + 2 E]$ , le niveau de confiance vaut 95 %. Autrement dit, la « vraie » valeur de  $X$  a 95 % de chances d'être comprise entre  $\langle X \rangle - 2 E$  et  $\langle X \rangle + 2 E$ .

En choisissant l'intervalle de confiance  $[\langle X \rangle - 3 E, \langle X \rangle + 3 E]$ , le niveau de confiance vaut 98 %. Autrement dit, la « vraie » valeur de  $X$  a 98 % de chances d'être comprise entre  $\langle X \rangle - 3 E$  et  $\langle X \rangle + 3 E$ .

**Questions**

Cet exercice propose d'étudier le caractère relatif du temps, conséquence immédiate des deux postulats d'Einstein introduits dans sa théorie de la relativité restreinte en 1905. Après avoir défini et étudié le phénomène de dilatation des durées, on propose d'étudier une preuve expérimentale.

**Partie I : La notion de temps dans la théorie de la relativité restreinte**

**1. Définitions**

- a. Dans le **document 1**, qu'entend Einstein par le mot « événement » ? Donner une définition. Qu'entend-il par « événements simultanés » ?
- b. Dans le **document 1**, qu'entend Einstein par « temps du système au repos » ? Quel autre nom porte ce « temps » ainsi défini ? Donner une définition claire.

**2. Approche qualitative de la dilatation des durées**

- a. Expliquer qualitativement, en s'aidant du **document 2** et sans calcul ni relation mathématique, le phénomène de dilatation du temps. Pourquoi parle-t-on de « dilatation » ?
- b. Lire attentivement le deuxième extrait du **document 2**. À l'aide de la question **2.a.**, compléter par « avance » ou par « retarde » la phrase qui suit cet extrait dans l'article d'A. Einstein : « L'horloge qui a été déplacée de A à B [à compléter] sur celle qui a gardé sa position invariable en B. »

**3. Approche quantitative de la dilatation des durées**

On réalise l'expérience de pensée détaillée dans le **document 3**.

- a. Donner l'expression de  $\Delta t$ . S'agit-il d'un temps propre ? Justifier.
- b. Établir l'expression de  $\Delta t'$ . Montrer que l'on peut écrire  $\Delta t' = \gamma \Delta t$ .  
On donnera l'expression de  $\gamma$  en fonction de  $v$  et de la vitesse de la lumière dans le vide notée  $c$ .
- c.  $\gamma$  est-il plus petit ou plus grand que 1 ? Justifier. Comparer alors  $\Delta t'$  et  $\Delta t$ . Conclure sur le phénomène de dilatation du temps.

- d. En utilisant la valeur numérique donnée au **document 5**, calculer numériquement  $\gamma$  pour un muon provenant de la haute atmosphère.

## Partie II : Preuve expérimentale : l'expérience de D. Frisch et J. Smith [1963]

### 1. Résultats expérimentaux

On appelle  $N_1$  le nombre moyen de muons détectés au niveau du mont Washington en une heure, et  $N_2$  le nombre moyen de muons détectés au niveau de Cambridge en une heure.

- En exploitant les 5 essais du **document 3**, donner la valeur de  $N_1$ . Estimer et justifier l'incertitude sur cette valeur pour avoir un intervalle de confiance de 95 %. On pourra utiliser les **documents 8 et 9**.
- Déterminer de même la valeur de  $N_2$ . Estimer de même l'incertitude sur cette valeur pour avoir un intervalle de confiance de 95 %.
- Dans leur expérience, D. Frisch et J. Smith n'ont pas pris en compte les erreurs systématiques. Qu'entendent-ils par « erreurs systématiques » ? Donner un exemple d'erreur systématique dans une expérience de votre choix.

### 2. Interprétation des résultats expérimentaux

- À l'aide du **document 4**, exprimer  $N_2$  en fonction de  $N_1, \tau, h$  et  $v$  sans prendre en compte le phénomène de dilatation du temps.
- Faire l'application numérique pour  $N_2$  connaissant  $N_1, \tau, h$  et  $v$  (on prendra  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ ). Comparer à la valeur expérimentale réelle. Au regard des incertitudes évaluées en **1.b.**, l'écart entre la valeur théorique et la valeur expérimentale peut-il raisonnablement provenir de l'expérience ?
- En prenant en compte cette fois le phénomène de dilatation du temps, exprimer de nouveau  $N_2$  en fonction de  $N_1, \tau, h, v$  et  $c$ . On pourra introduire le facteur  $\gamma$  de la question **3.b.** de la **partie I**.
- Faire de nouveau l'application numérique. Conclure.

### 3. Mesure du temps propre de désintégration d'un muon

On souhaite exploiter le **document 7** pour retrouver le temps de vie propre  $\tau$  d'un muon.

- Laquelle des **figures a** ou **b** peut permettre de déterminer  $\tau$  ? Justifier, et donner sa valeur.
- Comparer à la valeur précise de  $\tau$  donnée dans le **document 3**. La valeur déterminée en **a.** vous semble-t-elle d'une précision convenable ? Proposer un protocole expérimental pour améliorer la précision de la mesure.