

Exposition itinérante « Mesurer le temps »

Réalisation : Laboratoire SYRTE, Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 PARIS, avec l'aide de professeurs de lycée.

Soutiens : Observatoire de Paris, CNRS, LNE, UPMC, Laboratoire d'excellence FIRST-TF, Musée de Radio France, Chaire Blaise Pascal.

Contenu :

10 panneaux en Bâche PVC ignifugée M1
Dimensions de chaque panneau : 153 x 78 cm
Panneaux équipés d'œilletons périphériques pour la fixation

→ Possibilité de disposer d'une horloge synchronisée automatiquement sur le temps atomique de l'Observatoire de Paris (temps légal français).

Suivant la configuration locale, synchronisation possible par internet (protocole NTP), ondes radio (France-Inter grandes ondes), GPS

→ Possibilité d'emprunter un détecteur de muons cosmiques permettant de mettre en œuvre des expériences illustrant la relativité restreinte (matériel utilisable uniquement par un professeur)

Public visé : Lycéens, enseignants, grand public

Résumé :

Cette exposition itinérante vise à présenter différents aspects de la mesure du temps et de ses applications, sous différents angles (historiques, contemporains) mais avec un objectif pédagogique. Elle a été réalisée à partir de l'exposition « Misurare il tempo » réalisée par la même équipe pour le Festival della Scienza qui s'est déroulé à Gênes (Italie) en octobre 2014, avec environ 180 000 visiteurs¹.



Exposition « Misurare il tempo » au Palais de la Bourse, Gênes (Festival della Scienza 2014)

¹ Page web de l'exposition :

http://www.festivalscienza.it/site/cachegsearch.jsp?g_access=p&g_entqr=0&g_output=xml_no_dtd&g_sort=date%3AD%3A%3Ad1&g_site=festivalscienza&g_ie=UTF-8&g_btnG=Google+Search&g_client=default_frontend&g_ip=192.168.137.161&instance=2&channel=10000053&node=10002531&g_q=cache:o5WbbXP0KKQJ:www.festivalscienza.it/site/home/programma/eventi-per-tipo/mostre/misurare-il-tempo.html+misurare%20il%20tempo

L'exposition est composée de 4 parties (panneaux présentés dans l'annexe 1) :

- 1) Histoire de la mesure du temps à l'Observatoire de Paris (panneaux 2, 3)
- 2) La diffusion de l'heure (panneaux 4, 5)
- 3) Principes et applications de la mesure du temps – Horloges atomiques (panneaux 6, 7, 8)
- 4) Relativité du temps (panneaux 9, 10)

Il est aussi possible d'installer une horloge synchronisée automatiquement sur le temps atomique de l'Observatoire de Paris (par internet, ondes radio ou GPS) en complément des panneaux décrivant les techniques de diffusion de l'heure. Les caractéristiques de cette horloge sont décrites en annexe 2.

Dans certains cas, un détecteur de muons cosmiques permettant de mettre en œuvre des expériences illustrant la relativité restreinte peut aussi être mis à disposition sur demande (utilisable uniquement par un professeur).

ANNEXE 1 – Panneaux de l'exposition itinérante

Panneau A0

MESURER LE TEMPS
des mouvements planétaires aux oscillations des atomes

Le temps est omniprésent dans les sciences, les techniques, la société, l'économie, les arts.

Sans le savoir, nous utilisons des mesures très précises de temps dans notre vie quotidienne quand nous téléphonons, surfons sur internet, prenons des transports mais aussi quand nous nous positionnons par GPS.

Cette exposition présente différentes facettes de la mesure du temps sous ses aspects historiques et contemporains.

Réalisation : SYRTE – Systèmes de Référence Temps-Espace (Observatoire de Paris, CNRS, LNE, UPMC)

Avec le soutien de :

Panneau A1

HISTORIQUE DE LA MESURE DU TEMPS À L'OBSERVATOIRE DE PARIS

Deux mouvements concernent la Terre : sa rotation, entraînant la succession des jours, et sa révolution autour du Soleil correspondant à l'année. La rotation détermine l'allongement des jours et des nuits, et conduit à utiliser le temps moyen avec un jour solaire d'une durée de 24 heures. La révolution autour du Soleil fixe le rythme des saisons et détermine le temps sidéral dont le jour est plus court de quatre minutes que celui du temps moyen.

Lunette méridienne transportable

Système de pendule à double cadran / 1920 permettant aux astronomes de disposer dans leur bureau des temps moyen et sidéral.

La lunette méridienne fut un instrument permettant de connaître l'instant de passage d'un astre sur un méridien donné. Cette observation fournit le temps moyen si l'astre considéré est le Soleil ; elle fournit le temps sidéral si l'astre considéré est une étoile. Les astronomes devaient disposer simultanément de ces deux temps en vue de leurs observations. Ils utilisaient pour cela une pendule à double cadran, créée dans les années 1920 par Ernest Esclangon (1876-1954) alors directeur de l'Observatoire de Strasbourg.

Dans les années 1870, des centres horaires pilotés par des horloges directrices installées dans la salle des pendules à l'Observatoire de Paris fournissaient l'heure aux parisiens. Il était aussi possible de contrôler ses montres à l'entrée de l'Observatoire.

Salle des pendules à l'Observatoire de Paris

A partir de l'avènement du télégraphe électrique, puis de la télégraphie sans fil, l'Observatoire de Paris s'implique dans la diffusion de l'heure, non seulement pour les astronomes et le public, mais aussi pour tous ceux qui ont besoin de l'heure avec la meilleure précision possible.

Ligne méridienne au travers la salle Casini à l'Observatoire de Paris

Panneau A2

LA CRÉATION DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS

Le 21 juin 1467, les astronomes de l'Académie Royale des Sciences se réunissent au sud de Paris à peine peuplée à cette époque. Par observation du Soleil à midi, ils déterminent le méridien du lieu, autour duquel devra être construit l'Observatoire Royal de Louis XIV.

Sur une gravure de l'époque, on voit l'Observatoire, dont la construction du gros œuvre s'étendra de 1607 à 1672.





L'Observatoire de Paris en construction.

Bientôt les astronomes installent des secteurs sur les murs de la grande salle du deuxième étage, parallèles au Méridien, et y placent leurs horloges. Pour leurs observations des planètes et de la Lune, ils installent des objectifs de grande longueur focale sur le rebord du bâtiment ou sur une tour du jardin. La façade nord de l'Observatoire figure sur une peinture représentant l'éclipse de soleil visible à Paris le matin du 3 mai 1715.

Création de l'Observatoire (1633-1714), monument classé à l'Académie des Sciences. Sur le front apparaît l'Observatoire de Paris en construction.

Motif de l'éclipse totale de soleil représentée comme éclipse partielle observée à Paris, le matin du 3 mai 1715. Au fond, la façade nord de l'Observatoire est visible.

Observations de la Lune, de Jupiter et de Saturne à l'Observatoire de Paris.

Panneau B1

LA DIFFUSION DE L'HEURE : DE LA TOUR-EIFFEL À INTERNET

Suite à l'invention de la télégraphie sans fil, l'heure put aussi être distribuée par ondes radio et, grâce au Général Gustave Ferme (1868-1932), des signaux horaires synchronisés sur l'heure de l'Observatoire de Paris furent diffusés à partir de 1910 depuis des antennes géantes fixées au sommet de la Tour Eiffel. Ces signaux horaires qui étaient reçus à plusieurs milliers de kilomètres étaient aussi très utiles aux navigateurs.

La Tour Eiffel, construite pour l'exposition universelle de 1889, aurait dû être démontée en 1910 car la présence des cas si ses lettres disgracieux et géant il, comme certains intellectuels la qualifiaient alors, soulevait de vives polémiques. Mais son utilisation pour émettre des ondes radio à très longue portée la sauva de son démontage qui avait été initialement prévu après l'exposition universelle de 1889.

La synchronisation d'horloges par ondes radio est toujours utilisée aujourd'hui, avec un émetteur très puissant (2 MW) et une antenne de 350 m de hauteur, installés à Aitoul à côté de Bourges dans le centre de la France. Sa précision est environ de 10 ms.

Le développement rapide d'Internet a par ailleurs permis de mettre en œuvre des protocoles pour mettre à l'heure et synchroniser à grande échelle des systèmes informatiques, des ordinateurs et des objets connectés avec des signaux échangés par fibres optiques. Même si la précision actuelle n'est que de quelques ms, des techniques innovantes élaborées dans les laboratoires permettront bientôt d'atteindre des précisions à la microseconde (millionième de seconde) puis à la nanoseconde.

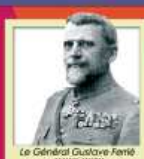



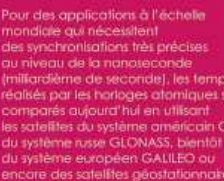



Ordonnance de l'Empereur Napoléon III en T. S. F.

Objets antérieurs de télégraphie sans fil installés depuis le sommet de la Tour Eiffel.

LA T. S. F.

Signaux horaires

Horloge synchronisée par NTP

Panneau B2

LA DIFFUSION DE L'HEURE LÉGALE EN FRANCE

Au XIXe siècle, chaque ville avait son heure propre liée par le soleil, ce qui posa rapidement des problèmes avec les transports ferroviaires qui se développaient rapidement. Mais il fallut attendre 1891 pour que l'heure soit unifiée en France et que l'heure du méridien de Paris devienne la référence légale française. Cette heure de référence fut réalisée à partir de 1911 par des horloges à pression constante installées dans des canalisations sous l'Observatoire, proches des catacombes, dont la température est la seule variable à l'heure une précision remarquable de 0,1 seconde. Ces horloges furent remplacées en 1931 par des horloges à quartz puis depuis les années 60 par des horloges atomiques.

Table de la Loi 1891
sur l'unification de l'heure en France

Ernest Esclangon
 directeur de l'Observatoire de Paris (1909-1944)

La première horloge parlante au monde
 naquit le 14 février 1933 et eut immédiatement un succès considérable : les vingt lignes prévues pour ce service furent immédiatement saturées avec plus de 140 000 appels le premier jour. L'horloge parlante actuelle diffuse l'heure de l'Observatoire de Paris par téléphone avec une précision pour l'utilisateur de 50 millisecondes (50 millièmes de seconde).

Horloge parlante actuellement installée à l'Observatoire de Paris







Panneau C1

COMMENT MESURER LE TEMPS ?

Une durée peut être mesurée avec un phénomène physique évoluant linéairement avec le temps, comme l'écoulement du sable dans un sablier ou de l'eau dans une clepsydre. L'augmentation linéaire de l'angle de rotation de la Terre mesuré par rapport à des étoiles fixes a longtemps été utilisée pour indiquer l'heure. Mais les marées, les effets atmosphériques et hydrologiques induisent des irrégularités dans la rotation de la Terre qui ne peuvent pas être prédites.

Une autre approche consiste à utiliser une règle temporelle réalisée par un oscillateur qui fournit un signal périodique caractérisé par sa période (la graduation temporelle élémentaire) et sa fréquence (nombre de périodes par seconde). On mesure alors une durée en comptant le nombre d'oscillations entre les instants de début et de fin. Connaissant la valeur de la période, on en déduit la valeur de la durée.

La mesure du temps avec un oscillateur est d'autant plus précise que sa graduation temporelle est fine, c'est-à-dire que sa fréquence est élevée. Ainsi, une durée d'une seconde est découpée en :

- quelques battements d'un oscillateur mécanique
- 32768 battements d'un oscillateur à quartz de montre
- 10 milliards de battements de l'oscillateur micro-onde d'une horloge atomique à césium
- 500 000 milliards de battements de l'oscillateur laser d'une horloge optique.

Qu'il soit mécanique, électrique ou optique, un oscillateur délivre une fréquence dépendant de sa géométrie, de ses dimensions et de l'environnement (température, pression, gravité...). Les fluctuations de cette fréquence qui en résultent peuvent être éliminées en stabilisant la fréquence de l'oscillateur sur une référence atomique absolue : c'est le principe d'une horloge atomique.


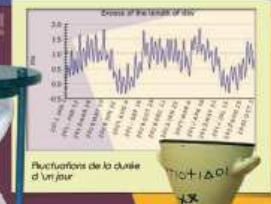

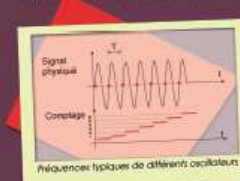


La fréquence d'oscillation d'un pendule dépend de sa longueur et du champ de gravité. Dès la fin du XVIIIe siècle, les savants ont commencé à mesurer la fréquence d'un pendule oscillant par la méthode du lieu à l'aide de l'appareillement de la lame et de la force centrifuge due à sa rotation.

Fluctuations de la durée d'un jour

Signal physique
Complexe

Fréquences typiques de différents oscillateurs

Mesure d'une durée en comptant un nombre d'oscillations









Panneau C2

LES HORLOGES ATOMIQUES


En physique quantique, un atome ne peut occuper que des niveaux d'énergie de valeurs bien déterminées. L'écart entre deux niveaux d'énergie est associé à une fréquence, appelée fréquence de résonance atomique, dont la valeur est très bien connue, stable et identique pour tous les atomes d'un même élément.

Dans une horloge atomique, le signal issu d'un oscillateur interfagit avec des atomes. L'information fournie par les atomes lors de cette interaction permet alors d'ajuster la fréquence de l'oscillateur sur la fréquence de résonance atomique.




Principe d'une horloge atomique

Atomes refroidis par laser

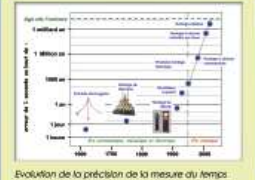


Les meilleures horloges utilisent actuellement des atomes qui sont refroidis avec de la lumière laser à des températures extrêmement basses : 1 milliardième de degré du zéro absolu ! Le laser permet aussi de piéger les atomes afin de les observer plus longtemps et d'améliorer encore plus loin la précision de l'horloge.

Atomes piégés grâce à la lumière laser



Depuis leur invention au milieu du XXe siècle, les horloges atomiques ont vu leur précision s'améliorer d'un facteur 10 tous les 10 ans. Aujourd'hui, les meilleures horloges ont une précision de 17 chiffres, correspondant à une dérive de 0,000 000 000 001 seconde au bout d'un jour, soit seulement 1 seconde au bout de 3 milliards d'années.




Evolution de la précision de la mesure du temps


Une des trois fontaines à atomes de césium refroidies par laser développées au STRIE (Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, UMR)

En fonction des applications, de nombreux types d'horloges atomiques sont développés, depuis des expériences de laboratoires jusqu'à des horloges spatiales ou des dispositifs miniaturisés de quelques cm³.

Horloge spatiale à atomes de strontium refroidis et piégés par laser



Horloge atomique miniaturisée



Horloge miniaturisée dans la satellite de positionnement GALILEO

Panneau C3

APPLICATIONS DE LA MESURE PRÉCISE DU TEMPS

Les mesures très précises du temps sont essentielles pour la recherche scientifique mais aussi pour les applications de la vie quotidienne, l'économie, les transports, la sécurité.

La relativité d'Einstein est un des piliers de la physique contemporaine mais de nombreuses expériences cherchent à observer une violation de la théorie d'Einstein en utilisant des horloges atomiques ultra-précises. C'est un des objectifs de la mission européenne ACES - Atomic Clock Ensemble in Space qui installera en 2016 à bord de la station spatiale internationale l'horloge à atomes refroidis par laser PHAROS développée en France.

Le lien entre espace et temps est aussi mis à profit dans les systèmes de positionnement par satellites (GPS et bientôt GALILEO). Grâce à la relativité d'Einstein et la constance de la vitesse de la lumière, la position d'un utilisateur est déterminée à partir des mesures des temps de propagation des signaux émis depuis les satellites. La précision dans la mesure du temps est essentielle car une erreur de 1 milliardième de seconde conduit à une erreur de positionnement de 300 m !

La vitesse parcourue par la lumière est une constante $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

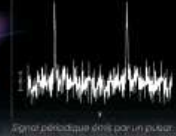
$$D = c \times \Delta t$$

Principe du positionnement par satellites

Les applications scientifiques du GPS sont nombreuses : mesure de la dérive des continents, étude de l'atmosphère, datation des pulsars, interférométrie à très longue base, etc.

La synchronisation d'horloges à très grande échelle est au cœur du fonctionnement des réseaux de télécommunications ou de distribution d'énergie, dans un monde où des milliards d'objets seront bientôt interconnectés.





Panneau D1

LE TEMPS EST RELATIF

La théorie de la relativité d'Einstein postule que la mesure du temps par une horloge dépend de l'observateur.

Le temps mesuré par une horloge dépend de sa vitesse :
Si on compare deux horloges après une excursion d'un tas de bois, l'horloge qui se déplace mesure un temps plus petit qu'une horloge restée fixe. C'est le phénomène de la dilatation des temps.

Phénomène de dilatation du temps

Le temps mesuré par une horloge dépend de la gravité locale :
Une horloge soumise à une gravité plus grande, au sol, bat le temps plus lentement qu'une horloge en hauteur, par exemple dans un satellite.

Dilatation gravitationnelle du temps

L'horloge à bord d'un satellite GPS est à une altitude de 20 000 km et se déplace à une vitesse proche de 4 km par seconde par rapport au sol.

Du fait de sa vitesse, l'horloge du satellite est ralentie par rapport à celle restée au sol de 7 microsecondes (0,000 007 s) par jour, ce qui correspond à une erreur de mesure de 2 km par jour pour le GPS.

Du fait de son altitude élevée, l'horloge dans le satellite se trouve dans une pesanteur plus faible qu'une horloge restée sur Terre. Par conséquent, l'horloge du satellite est accélérée de 46 microsecondes par jour, ce qui correspond à une erreur de 14 km par jour pour la mesure du GPS.

Décalage du temps de l'horloge spatiale dû aux effets relativistes

Au total, l'horloge d'un satellite GPS est donc accélérée d'environ 40 microsecondes par jour. Si ce décalage relativiste n'était pas corrigé, le GPS se tromperait au total de 12 km par jour.

Panneau D2

LES MUONS COSMIQUES

Des rayons cosmiques très énergétiques, provenant du Soleil ou du fin fond de l'Univers, sont utilisés par l'atmosphère à 10 km de la surface de la Terre en effectuant une collision avec les molécules d'air. Cette collision à grande énergie, analogue à celles que l'on peut observer dans les accélérateurs de particules, provoque la création de nombreuses particules nouvelles qui se propagent dans l'atmosphère à des vitesses proches de celle de la lumière sous la forme de gigantesques gerbes cosmiques.

Reproduction artificielle des gerbes cosmiques

Collision entre une particule cosmique de haute énergie et un atome dans une émulsion photographique

La présence de ces particules issues de rayons cosmiques fut mise en évidence pour la première fois par le père Théodore WULF (1868-1946) qui réalisa des mesures en haut de la Tour Eiffel en 1907, puis confirmée par Viktor F. HESS (1883-1964) qui effectua des mesures en ballon en 1912.

Viktor Hess à bord du ballon pour la détection des particules cosmiques

Parmi ces particules, certaines, nommées muons, sont particulièrement instables : elles se désintègrent en moyenne au bout de seulement 2,2 microsecondes.

Ces particules sont créées à une altitude de 10 km et vont à une vitesse proche de celle de la lumière par rapport au sol : au bout de 2,2 microsecondes, elles devraient avoir parcouru 660 mètres avant de se désintégrer et ne jamais pouvoir atteindre un détecteur au sol.

Formules décrivant la dilatation du temps pour une particule à la vitesse v , c est la vitesse de la lumière

$$\Delta T = \gamma \cdot \Delta \tau$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Cependant, du fait du phénomène de dilatation des temps, la relativité affirme que, pour un muon allant à une vitesse de 99,875 % de la vitesse de la lumière (vitesse usuelle pour ces particules), si 2,2 microsecondes se sont écoulées pour le muon, il s'écoule un temps 20 fois plus long pour un observateur et son détecteur fixes au sol. Un temps 20 fois plus long est largement suffisant pour permettre au muon de traverser les 10 km de l'atmosphère et être détecté par l'observateur.

Détecteur de muons cosmiques

Annexe 2 – Horloge synchronisée sur le temps atomique de l’Observatoire de Paris



Cette horloge est mise à l’heure automatiquement sur le temps atomique de l’Observatoire de Paris qui est le temps légal en France.

En fonction de la configuration du site de l’exposition, il existe trois modes de synchronisation automatique.

Mode de synchronisation	Besoins	Contraintes particulières
Internet (protocole NTP)	Alimentation 220 V Raccordement par câble à internet Connexion au serveur ntp.obspm.fr via le port UDP 123	Prise ethernet pas trop éloignée (< 20 m) Concernant l'adresse IP, il faut nous préciser si on nous attribuera une IP fixe ou s'il faut communiquer l'adresse MAC de l'horloge pour en obtenir une automatiquement via DHCP.
Ondes Radio (France Inter grandes ondes 162 kHz)	Alimentation 220 V	Réception des ondes radio (le local ne doit pas être souterrain)
GPS	Alimentation 220 V	Proximité d’une ouverture à proximité (< 5-10 m) pour installer une antenne patch GPS