

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PHY 3012 – ÉVOLUTION DES CONCEPTS EN PHYSIQUE

Projet Final - La Métrologie du Temps dans l'Histoire

par :

Patrice Béchard

20019173

21 décembre 2016

Table des matières

1	Introduction	2
2	Les calendriers : compter les jours	2
3	Les cadrans solaires : les premiers outils pour mesurer les heures	4
4	Les clepsydes, sabliers et bougies : des outils plus pratiques	7
4.1	Les clepsydes	7
4.2	Les bougies	8
4.3	Les sabliers	9
5	Les horloges mécanique : les débuts de la métrologie précise du temps	10
5.1	Le problème de la longitude	11
6	Les horloges électriques et au quartz : de plus grandes fréquences utilisées	13
6.1	Les horloges électriques	13
6.2	Les horloges au quartz	13
7	Les horloges atomiques : vers une précision absolue	15
8	Conclusion	17
	Bibliographie	19

1 Introduction

Les civilisations ont toujours voulu, à ce que l'on sache, diviser le temps qui passait en diverses unités. Par exemple, en remarquant que les saisons étaient cycliques, et qu'après un été vient un hiver, puis un été, etc. ils définirent un de ces cycles comme étant une année. Ils définirent aussi la durée d'un cycle lunaire comme étant un mois. De plus, la rotation de la Terre autour d'elle-même fait en sorte que le Soleil semble aller et venir en alternance. Ils appelèrent cette unité de temps le jour. Plus tard, ils décidèrent de séparer ce jour en douze parties égales, qu'ils appelèrent les heures. C'est aux Mésopotamiens que l'on doit le calcul des fractions de la journée en base soixante. Leurs mathématiques entières reposaient sur cette base. Le chiffre 60 est en effet plutôt unique, étant à la fois divisible par 12 nombres entiers, soit 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30 et 60[37].

Pour mesurer ces unités de temps, les civilisations ont développé une panoplie de différents instruments, reposant sur le principe du mouvement des astres, de la chute d'un liquide ou d'un corps, de la combustion d'une chandelle ou encore de l'oscillation d'un objet ou d'un atome. Ce texte présente l'histoire de chacun des instruments utilisés dans l'histoire pour mesurer le temps et leur évolution. Je présenterai tout d'abord un bref aperçu de l'histoire des calendriers, puis présenterai le cadran solaire, qui était le premier outil pour mesurer le temps à une échelle plus petite qu'une journée. Je présenterai ensuite divers instruments, comme la clepsydre ou le sablier, que les gens utilisaient comme méthode alternative pour mesurer le temps en parallèle avec le cadran solaire. Cela nous mènera ensuite à l'apparition de l'horloge mécanique, qui se basera pour la toute première fois sur l'oscillation d'un corps pour mesurer le temps. Finalement, je présenterai des types d'horloges apparus au 20^e siècle qui furent des pas de géant en termes de précision de la mesure du temps, soit l'horloge au quartz et l'horloge atomique, et je présenterai brièvement ce qui en est du futur de la métrologie du temps comme discipline de la physique.

2 Les calendriers : compter les jours

Les civilisations se sont tout d'abord basé sur le mouvement des astres pour mesurer le temps. Les calendriers étaient utilisés pour dénombrer les jours et les échelles de temps plus grandes, comme les saisons ou les années[12].

Un jour est l'unité la plus courte du calendrier et représente le temps écoulé pour une rotation complète de la Terre autour de son axe. Sa durée est de 24h en moyenne, en omettant les fluctuations de la rotation de la Terre due aux effets gravitationnels de la lune, notamment. L'utilisation du jour comme unité de base d'un calendrier, signe de l'alternance entre le jour et la nuit, est universelle à tous les calendriers ayant déjà été découvert[13].

L'année tropique est aussi une unité de temps basée sur un phénomène astronomique, soit une orbite complète de la Terre autour du Soleil. Sa durée approximative est de 365.2421 jours. Un mois synodique, aussi appelé *lunaison*, est basé sur une orbite complète de la Lune autour de la Terre et possède une durée approximative de 29.53 jours. La semaine n'est cependant pas un phénomène basé sur l'astronomie, et son origine historique reste nébuleuse[13].

Historiquement, les calendriers ont servi à planifier les cycles d'agriculture, de chasse, de migration des troupeaux, ainsi qu'à réguler le cycle d'événements culturels d'une civilisation. Cet outil permettait de comprendre le cycle du temps. L'origine des premiers calendriers reste nébuleuse. Ce que l'on croit être les plus vieux calendriers lunaires datent d'il y a 15000 ans et se trouvent dans les grottes de Lascaux, en France. Certaines des fresques dessinées sur les parois de la grotte représenteraient les phases de la lune, selon Dr. Michael Rappenglueck, de l'Université de Munich[13].

Plus tard, vers 3000 av. J.C., des civilisations comme les Babyloniens et les Égyptiens concoctèrent des calendriers plus élaborés, possédant des saisons, mois et années. Puisque la division d'une année tropique par un mois synodique n'est pas exacte, les calendriers développés n'étaient pas parfaits, ne l'étant pas plus aujourd'hui. Les Babyloniens utilisaient un calendrier avec douze mois alternant entre 29 et 30 jours, basés sur les phases de la lune, auxquels on ajoutait trois mois de plus à chaque huit ans pour retrouver la même position par rapport à l'année tropique. Les Égyptiens furent fort probablement les premiers à adopter un calendrier s'appuyant majoritairement sur la position des étoiles dans le ciel, et donc de la position de la Terre par-rapport au Soleil. Après s'être basé sur la rotation de la Lune pendant longtemps, ils se fièrent à l'étoile Sirius pour prédire l'inondation du Nil, événement récurrent à chaque année[13][35].

Trois types principaux de calendriers servent encore de base aux calendriers d'aujourd'hui. Les calendriers *lunaires*, comme le calendrier islamique, sont basés sur le mois synodique et décalent donc constamment de l'année tropique. Les calendriers *solaires*, comme le calendrier grégorien, lequel nous utilisons, sont plutôt basés sur l'année tropique, possédant des mois n'étant plus tous de la même longueur. Finalement, les calendriers *luni-solaires*, comme le calendrier chinois ou le calendrier hébreux, sont basés sur la lune, mais lorsque l'année prend trop de retard sur l'année tropique, un mois est ajouté pour revenir au même endroit par rapport au Soleil.

Les calendriers sont donc les premières traces de la mesure du temps à grande échelle. Cette organisation des jours permettait une meilleure planification pour les récoltes et les fêtes, entre autres. Cependant, cette mesure du temps ne permettait pas de quantifier de plus courtes durées. D'autres outils se sont donc développés à la même époque pour régler le problème.

3 Les cadrans solaires : les premiers outils pour mesurer les heures

La première invention permettant de mesurer le temps plus petit qu’une journée était le cadran solaire. La mesure de l’heure à l’aide du Soleil est loin d’être triviale. Le principe premier sur lequel le cadran solaire s’appuie est le fait que la Terre tourne sur elle-même. De notre référentiel, on observe donc le Soleil se déplacer dans le ciel d’est en ouest au cours de la journée, ce qu’on appelle le mouvement diurne. C’est en observant l’ombre produit par un objet que l’on pourra en déduire l’heure qu’il est. Le fait que l’axe de rotation de la Terre ne soit pas perpendiculaire au plan de son orbite a aussi son rôle à jouer dans la mesure de l’heure. On sait que cet axe est à l’origine des saisons, mais c’est aussi à cause de celle-ci que les jours seront plus longs en été et moins en hiver[42]. Pour simplifier, faisons l’approximation que le Soleil est levé pendant 16 heures au solstice d’été, alors qu’il l’est pour seulement 8 heures au solstice d’hiver. Les journées durent donc 12 heures aux équinoxes. Tous les cadrans solaires utilisés pendant l’Antiquité et même plus tard mesuraient des heures dites *antiques* (ou encore *inéga*le ou *temporaire*). Une heure était à l’époque une fraction de 1/12 d’une journée, du lever au coucher du Soleil. Cela dit, puisque la longueur des journées variait en fonction des saisons, la longueur d’une heure antique en hiver était d’approximativement 40 minutes, tandis qu’en été, sa durée était plutôt de 80 minutes. Les heures ne duraient que 60 minutes aux équinoxes : on appela ces périodes de temps des heures *égales*, ou encore *équinoxiale*. Les étudits de l’époque, comme Ptolémée dans son *Almageste*, utilisaient l’heure égale dans leurs calculs astronomiques.

Les plus simples cadrans solaires sont aussi les premiers à avoir été inventés. Ceux-ci n’étaient constitués que d’une tige plantée dans le sol (appelée *gnomon*) produisant une ombre et étaient connus depuis l’Antiquité. Ceux-ci n’étaient pas seulement des outils nous permettant de connaître l’heure ; il était possible de connaître la latitude à laquelle on se trouve ainsi que la longueur des années grâce à celui-ci. Un peu plus tard, l’ombre produit par le gnomon fut projetée sur une plaque graduée permettant de savoir dans combien temps le Soleil allait se coucher et depuis combien de temps était-il levé. Le plus vieux cadran solaire découvert à ce jour date aux environs de 1500 avant. J.C. et a été découvert en Égypte dans la vallée des rois (voir figure 1a). Malgré n’ayant jamais été utilisé comme des gnomons par les Égyptiens, certains obélisques ont été expatriés en Europe par les Romains, notamment par l’empereur Auguste, qui les utilisa pour connaître l’heure.[16][23][42]

Plus tard, l’érudit babylonien Bérosee développa des cadrans solaires plus complexes, constitués d’un gnomon disposé dans un volume tel un cône ou une demi-sphère, s’appelant des *scaphé*. Ce volume était gradué avec douze bandes représentant les heures, ainsi que trois bandes leur étant perpendiculaires, qui permettaient de montrer la longueur des heures antiques : si l’ombre était projetée sur la bande plus près du gnomon, cela voulait dire que le Soleil était plus haut dans le ciel et que l’on se trouvait au

solstice d'été. Si l'ombre pointait plutôt sur la bande extérieure, on savait que l'on était au solstice d'hiver et que les heures étaient plus courtes. La bande centrale représentait les équinoxes. Une variante de ce type de cadrans solaires possédait un trou en haut, ne laissant passer qu'un rond de lumière, agissant comme un gnomon en pointant l'heure. Un exemplaire de ce type de scaphé, appelé scaphé à oeillet, peut être trouvé au musée du Louvre à Paris (voir figure 1b)[42]. Peu d'informations quant au processus par lequel les graduations étaient faites sont connues. On croit que les marques étaient plutôt déterminées empiriquement.

L'un des désavantages de ce type de cadrans était le fait que ceux-ci dépendaient de la position géographique du lieu et il n'était pas possible d'utiliser le même cadran en deux endroits, car les graduations dépendaient de la latitude où l'appareil était utilisé. Cependant, autour du III^e siècle après J.C., les Romains développèrent un type de cadran solaire portable en laiton, pas plus gros que 6 cm de diamètre, qu'il était possible d'ajuster en fonction de la ville dans laquelle on se situait. Un artéfact est présenté à la figure 1c.[42]



(a) Plus vieux cadran solaire découvert
(c. 1500 av. J.C.)[16]



(b) Scaphé à oeillet (II^es. ap. J.C.)[24]



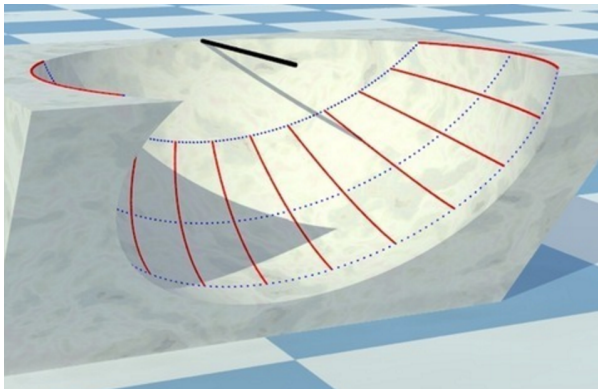
(c) Cadran portable (III^es. ap. J.C.)[22]

FIGURE 1 – Divers cadrans solaires antiques

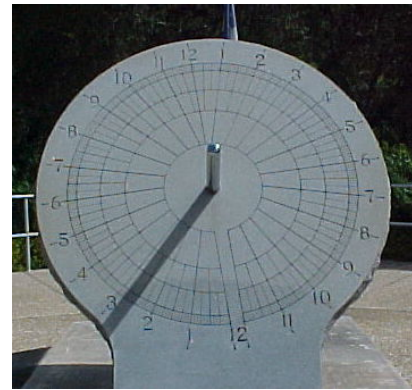
Autour du VIII^e siècle, le monde arabe redécouvrit les outils développés par le monde gréco-romain et amena plusieurs améliorations. Les cadrans solaires, qui étaient autrefois beaucoup moins répandus, furent popularisés dans les pays d'Islam. Les cadrans étaient utilisés pour connaître à quel moment les prières avaient lieu dans la journée. Un ajout très astucieux fut de graver un petit cercle sur le cadran, permettant de connaître la longueur du gnomon, équivalant au diamètre du cercle, pour le remplacer en cas de perte, ce qui était plutôt fréquent à l'époque. Au fil des siècles, les érudits publièrent de nombreux ouvrages permettant de calculer avec précision les graduations sur les cadrans, de sorte qu'il était possible de connaître précisément le moment de chaque prière dans la journée. Cette période florissante de développement des cadrans solaires dans les pays arabes s'étendit jusqu'au 18^e siècle[42].

Pendant ce temps, en Europe, très peu avait avancé depuis la chute de l'Empire romain, de sorte qu'au

13^e siècle, les graduations des cadrans étaient toujours faites empiriquement, sans calcul. Au 14^e siècle, la popularisation de l’horloge dans les grandes villes changea la donne (on abordera ce sujet plus tard, à la section 5). Puisque ces horloges mesuraient maintenant l’heure égale et ne dépendaient pas de la date, les cadrans solaires montrant l’heure antique ne répondaient plus aux besoins. Les ingénieurs de l’époque inventèrent alors le cadran équatorial, ou cadran à style polaire (le style était une tige prenant la place du gnomon), qui pointait vers le pôle nord céleste, la position moyenne de l’étoile polaire. De ce fait, l’ombre produit par le style indiquait maintenant l’heure égale et non plus l’heure antique. Alors que le bout de l’ombre du gnomon pointait quelle heure il était sur les cadrans antiques, le style du cadran équatorial suivait les graduations intégralement (voir figure 2)[42].



(a) Scaphé avec gnomon. Le bout de l’ombre du gnomon pointe l’heure. Il s’est écoulé trois heures depuis que le Soleil se soit levé et les heures sont plus longues que 60 minutes.[42]



(b) Cadran équatorial. Le style pointe vers le nord céleste. L’ombre suit les graduations sur le cadran. Il est presque trois heures de l’après-midi.[10]

FIGURE 2 – Comparaison entre les deux sortes de cadrans solaires.

Au 18^e siècle, en Inde, le maharaja Jai Singh II ordonna la construction de 5 observatoires astronomiques à travers le pays, le plus connu étant celui de Jaipur. Cet observatoire comportait 20 cadrans solaires seulement trouvés en Inde, appelée *rasivalaya*, permettant entre autres de mesurer la longitude écliptique du Soleil. Le cadran solaire du Samrat Yantra permettait de mesurer l’heure solaire à quelques minutes d’arc près, ce qui était l’une des mesures les plus précises de l’époque[42].

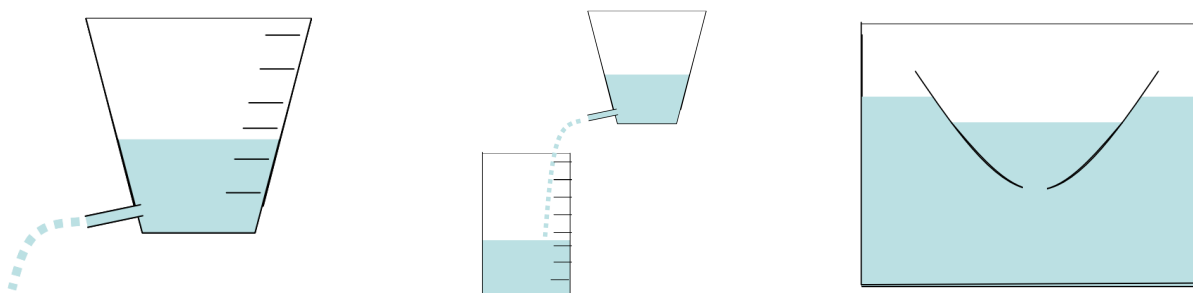
Le plus grand défaut des cadrans solaires est cependant le fait qu’il n’est pas possible de les utiliser lorsque le ciel est couvert ou encore lorsqu’il fait nuit. Cette situation a conduit au développement de plusieurs autres appareils permettant de mesurer le temps sans se baser sur les astres, lesquels sont présentés à la prochaine section.

4 Les clepsydras, sabliers et bougies : des outils plus pratiques

4.1 Les clepsydras

Pour remédier au problème de ne pas pouvoir mesurer le temps lorsque le Soleil n'était pas au rendez-vous, des outils mesurant le temps étant indépendants des astres ont été créés. Les clepsydras étaient des horloges utilisant le flot de l'eau pour mesurer le temps et sont les premiers appareils permettant de mesurer le temps la nuit ou lorsque le temps était couvert[43]. La plus vieille clepsydre découverte à ce jour date des alentours de 1417 à 1379 av. J.C. a été trouvée dans le tombeau du pharaon Amenhotep III. Les plus vieilles traces de cette technologie datent plutôt de 1600 av. J.C., alors que des inscriptions sur la tombe d'Amenemhet l'identifient comme l'inventeur[9][20].

Les premières clepsydras utilisées étaient des vases auxquels un trou était fait au centre pour permettre à l'eau de s'y échapper. Il était possible de mesurer le temps en connaissant le débit de l'eau s'échappant du vase. En graduant, ce dernier, il était facile de savoir combien de temps s'était écoulé depuis le moment où il était plein ou entre deux graduations. Ce type de clepsydre est nommé une clepsydre à débit d'eau sortant (*outflow clepsydra*). Le principe changea un peu plus tard, alors que les Grecs développèrent un nouveau type de clepsydre pour laquelle la mesure du temps se faisait en observant l'eau s'étant récoltée dans le récipient recevant l'eau qui s'écoulait (clepsydras à débit d'eau entrant, ou *inflow clepsydra*). En graduant cette dernière, il était encore une fois simple de connaître le temps s'étant écoulé en deux graduations. Un autre type de clepsydras de principe semblable a été inventé en Inde autour de 400 après J.C., alors que l'on déposait un vase troué au bas sur un bassin d'eau et on attendait que celui-ci coule. Ce type de clepsydre est nommé une clepsydre à bol coulant (*sinking bowl clepsydra*)[19]. Un schéma de chacun de ces types de clepsydras est présenté plus bas.



(a) clepsydre à débit d'eau sortant (b) clepsydras à débit d'eau entrant (c) clepsydre à bol coulant[19]

En Grèce antique, ces outils étaient utilisés notamment pour limiter le temps des discours politiques. Des écrits nous indiquent que les clepsydras étaient utilisées à Athènes dès 430 Av. J.C. et que de grandes personnalités de l'époque, comme le philosophe Aristote, le poète Aristophane et l'homme politique Démosthène utilisaient fréquemment ces dispositifs[33][40]. Un problème majeur persistait cependant,

puisque le débit d'eau émis par la clepsydre dépendait du niveau d'eau dans cette dernière. Les heures mesurées n'étaient donc pas toutes égales.

Les Grecs amenèrent une solution à ce problème en insérant un vase intermédiaire. Une source d'eau fournissait donc de l'eau au vase intermédiaire, possédant un débit moins grand que la source. Un tuyau empêchant les débordements était placé au haut du vase intermédiaire de sorte que l'eau contenue dans le vase intermédiaire soit constante et que le débit vers le réservoir servant à la mesure du temps ne varie pas. Plus tard, on ajouta un objet flottant sur l'eau, relié à un cadran par un système de pignon et crémaillère, permettant d'afficher l'heure sur un cadran[33]. Malgré les améliorations effectuées, plusieurs inconvénients sont toujours présents. Tout d'abord, la clepsydre n'est pas une horloge perpétuelle puisqu'il faut vider le réservoir lorsqu'il est plein. En d'autres mots, le cadran montré sur la figure ne peut pas faire plus qu'un tour avant que le réservoir soit plein. Cela engendre qu'il faut régler la clepsydre à chaque fois que l'on vide le réservoir, et ce, avec des horloges solaires. De plus, en des endroits où l'eau est moins facilement accessible, cette horloge perfectionnée n'est pas idéale, puisqu'elle demande constamment un approvisionnement en eau[19][40].

Des clepsydres à débit d'eau entrant ont aussi été développées indépendamment en Chine, notamment lors de la dynastie Han, s'étendant de 206 av. J.C. à 8 après J.C. Ils développèrent une solution alternative au problème du débit non uniforme de l'eau, en utilisant plusieurs vases (*clepsydres polyvasculaires*)[19]. Il est à noter que Galilée aurait utilisé la clepsydre lors de ses expériences du plan incliné et de la chute des corps, quoi que certaines sources affirment qu'il utilisait du mercure plutôt que de l'eau, et ce, à cause de la température de fusion du mercure, qui est de -37°C plutôt que de 0°C pour l'eau[4][43].

4.2 Les bougies

Plus tard dans l'histoire, au cours du Moyen Âge, une méthode alternative pour mesurer des périodes de temps plus courtes utilisait des bougies. En connaissant la vitesse à laquelle les bougies brûlaient, en s'assurant que la section de celles-ci soit constante, il était possible de connaître le temps en mesurant la longueur des chandelles à plusieurs moments. Ceci était donc une nouvelle méthode de mesurer le temps la nuit, tout comme pouvait le faire la clepsydre. Selon certains, dont l'historien américain Silvio Bedini, l'utilisation de chandelles pour mesurer le temps viendrait à l'origine de la Chine, et ce, à partir du 6e siècle après J.C :

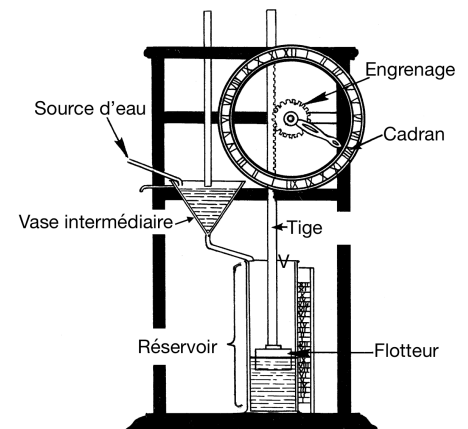


FIGURE 4 – Clepsydre avec vase intermédiaire[40]

«Quoique l'invention de l'horloge à feu ait été traditionnellement attribuée à Alfred le Grand, roi d'Angleterre, elle a manifestement une histoire antérieure en Orient.»[51]

Cette méthode se serait popularisée lors de la dynastie Sung, s'étendant de 960 à 1279. L'utilisation de bâtons d'encens comme méthode alternative était populaire, puisque ceux-ci étaient peu coûteux et avaient un processus sans flamme[51]. D'autres dispositifs plus élaborés utilisant les chandelles pour mesurer le temps ont été inventées par l'érudit Al-Jazari au XII^e siècle au Moyen-Orient, connu pour sa construction d'automates. L'un de ses appareils disposait de la cire fondue pour qu'elle ne ralentisse pas le temps pris à la chandelle pour fondre. Ses inventions sont les horloges à feu les plus complexes connues aujourd'hui[21].

4.3 Les sabliers

Les sabliers sont d'autres outils pour mesurer des intervalles de temps qui furent utilisés avant l'invention de l'horloge mécanique. Leur origine est très nébuleuse. Certaines sources affirment que le sablier a été inventé à Alexandrie vers 150 av. J.C.[44], tandis que d'autres évaluent plutôt que les sabliers ont été introduits en Europe par le moine franc Luitprand autour du VIII^e siècle après J.C.[32][43].

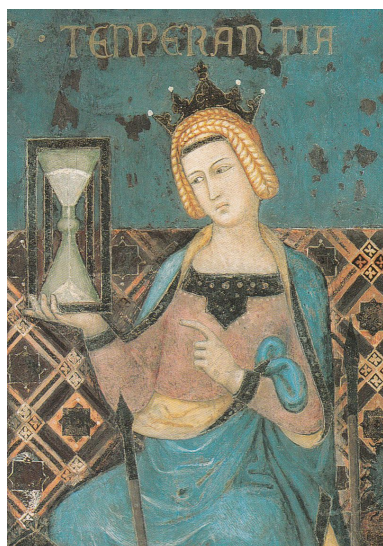


FIGURE 5 – Plus vieille représentation connue du sablier, par le peintre italien Ambrogio Lorenzetti, 1338[32]

Au XIV^e siècle, les sabliers étaient utilisés sur les bateaux, notamment lors des grandes explorations, alors qu'ils servaient à mesurer le temps pour les tours de garde. Ils étaient de grande utilité, ne demandant pas de connaissance de la latitude ou du mouvement du bateau, en opposition avec le cadran solaire. Ils étaient aussi très facilement utilisables, puisqu'il ne fallait que les retourner lorsque le sable avait fini de tomber pour recommencer le compte[31][32][43].

Le sablier s'avérait aussi plus pratique que la clepsydre dans les pays où l'eau était moins accessible facilement. Il était peu coûteux et mesurait des heures égales, tout comme la clepsydre[25]. Son utilisation était très répandue pour mesurer la durée des cours et les temps de cuisson en cuisine. Le principal inconvénient que posait le sablier était qu'il était difficile de mesurer de grands intervalles de temps avec celui-ci sans le retourner. Il fallait un sablier plutôt volumineux pour ne calculer qu'une heure, ce qu'une clepsydre ou un cadran solaire faisait sans grand problème[32][40].

5 Les horloges mécaniques : les débuts de la métrologie précise du temps

On attribue l'invention de l'horloge mécanique au moine et mathématicien Yi Xing, ainsi qu'à Liang Lingzan, un ingénieur militaire, qui construisirent, vers 725, en Chine, une version mécanisée de la clepsydre. Ils inventèrent le principe d'échappement, permettant de réguler et de compter les secondes (le tic-toc des horloges), utilisant l'eau ou le mercure pour mesurer ces intervalles[52].

C'est cependant en Europe que l'horloge mécanique connut son plus grand progrès, alors que l'échappement devint complètement mécanique, utilisant des poids au lieu d'un liquide pour perpétuer le mouvement des aiguilles. Les références historiques aux horloges mécaniques du 13^e au 16^e siècle devinrent très abondantes. Plusieurs horloges publiques furent construites dans les grandes villes, notamment à Paris au début du 14^e siècle et à Londres et Milan vers le milieu du siècle[47].

Au début du 16^e siècle, l'Allemand Peter Henlein construisit une horloge assez petite pour être transportée dans une sacoche, n'utilisant pas de poids et pouvant fonctionner pendant 40 heures d'affilée avant de devoir être réajustée. Il est considéré comme l'inventeur de la montre. C'est aussi à cette époque que l'idée d'utiliser les horloges pour mesurer la longitude en mer apparut pour la première fois, qui posait un problème d'envergure aux navigateurs.

Ce sont les physiciens Galilée et Christiaan Huygens qui furent les premiers à proposer l'utilisation du pendule pour mesurer le temps. Galilée apprit la mécanique aristotélicienne alors qu'il étudiait à l'Université de Pise vers 1580. Cette pensée exprimait que les corps lourds étaient attirés vers le centre de la Terre, alors que les corps plus légers tendaient à s'en éloigner. Le mouvement du pendule ne pouvait pas être expliqué par cette vision de la mécanique. Galilée posa plutôt l'hypothèse que la vitesse de chute d'un corps ne dépendait pas de sa masse, que tout corps en chute libre allait tomber à la même vitesse, et que cette vitesse était proportionnelle au temps de chute. Les écrits de Vincenzo Viviani, disciple de Galilée, racontent que son intérêt pour le problème du pendule vint en observant que la période d'oscillation de chandeliers au plafond d'une cathédrale ne dépendait pas de l'amplitude de cette oscillation. C'est ce qu'on appelle l'isochronisme du pendule[49]. Viviani rapporte aussi que Galilée aurait eu l'idée d'utiliser cette propriété du pendule dans les horloges :

One day in 1641, while I was living with him at his villa in Arcetri, I remember that the idea occurred to him that the pendulum could be adapted to clocks with weights or springs, serving in place of the usual tempo, he hoping that the very even and natural motions of the pendulum would correct all the defects in the art of clocks. But because his being deprived of sight prevented his making drawings and models to the desired effect, and his son Vincenzo

coming one day from Florence to Arcetri, Galileo told him his idea and several discussions followed. Finally they decided on the scheme shown in the accompanying drawing, to be put in practice to learn the fact of those difficulties in machines which are usually not foreseen in simple theorizing[15].

Vers la moitié du 17^e siècle, le mathématicien et physicien néerlandais Christiaan Huygens travailla sur le problème du pendule et confectionna en 1657 une horloge utilisant ce principe. Il essaya de breveter son invention, mais cette demande fut rejetée dans plusieurs pays, notamment en Allemagne et en Angleterre, où d'autres horlogers reprirent son idée. Il est le premier à dériver le résultat que la période d'un pendule idéal est $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ et ne dépend donc que de la longueur du pendule ainsi que de l'accélération gravitationnelle. Il observa aussi que lorsque l'on dispose deux pendules sur le même support côte à côte, ceux-ci vont se synchroniser. C'est ce qu'on appelle l'oscillation couplée. Il est donc possible grâce à ce principe de synchroniser deux horloges à pendule ensemble. Une vingtaine d'années plus tard, il développera un autre mécanisme permettant de mesurer le temps grâce à un autre oscillateur : la balance à ressort. Ce nouveau mécanisme pouvait être beaucoup plus compact qu'une horloge à pendule, et il en résulta qu'en 1675, Huygens déposa un brevet sur une montre de poche utilisant ce mécanisme[5][27].

Le physicien anglais Robert Hooke a construit un mécanisme quasiment identique à la même époque que Huygens. C'est Hooke qui fut le premier à découvrir que la période d'un ressort était définie par $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Certains croient même que l'idée d'utiliser un ressort comme oscillateur dans une horloge provient de Hooke et que Huygens en aurait entendu parler par la suite et aurait confectionné sa montre de poche. Quoi qu'il en soit, il est habituellement reconnu que les deux scientifiques ont développé leurs appareils de façon indépendante l'un de l'autre[50].

5.1 Le problème de la longitude

À cette époque la plus grande motivation pour la recherche d'un mécanisme pour mesurer le temps étant précis et exact était le problème de la longitude. Lorsqu'un navigateur était en mer, il était facile pour lui de connaître sa latitude à l'aide d'un sextant. Cependant, il leur était impossible de mesurer la longitude précisément à l'aide d'un outil, ce qui causa plusieurs naufrages dans l'histoire. C'est Gemma Frisius qui proposa pour la première fois d'avoir une horloge précise servant de standard à bord pour mesurer la longitude. En étant synchronisée à l'heure du port au départ du navire, cette horloge permettait de comparer

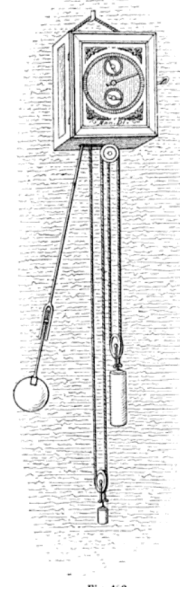


FIGURE 6 – Schéma de l'horloge à pendule développée par Huygens (1656)[17]

l'heure avec l'heure solaire locale du bateau lorsqu'il était midi pour connaître sa longitude en fonction de la longitude de la ville au départ. En ce faisant, la position du navire était complètement déterminée. Cependant, les horloges de l'époque ne permettaient pas d'obtenir une assez grande précision pour utiliser cette technique. Par exemple, une horloge qui perdait 5 minutes par jour, lors de longs voyages, pouvait avoir perdu plus d'une heure au total, et la technique devenait inutile[38].

L'horloge pendule possédait la meilleure précision de l'époque, mais il était impossible de l'utiliser sur un navire à cause du mouvement de celui-ci ainsi que de la faible variation de la gravité due aux marées. L'horloge pendule de Huygens a quand même été testée en mer en 1673. Son horloge utilisant la balance à ressort au aussi été testée en mer, mais sa précision n'était pas assez grande. Les variations de température à bord du navire influençaient beaucoup la précision de chaque seconde, puisque l'expansion thermique des métaux utilisés dans son mécanisme était grande. En 1714, le parlement britannique introduit le *Longitude Act*, promettant une récompense à la personne qui pourrait régler le problème de la longitude en mer. Les sommes offertes étaient très grandes pour l'époque, offrant jusqu'à £20000 (équivalent à £2.61M aujourd'hui) à celui qui trouverait une solution à ce problème[47].



FIGURE 7 – Chronomètre marin modèle H4, inventé par John Harrison (1761)[18]

C'est suite à cette annonce que la course au chronomètre marin le plus précis pris de l'ampleur. L'Anglais Jeremy Thacker essaya d'en construire une en 1714, comme le fit le Français Henry Sully, en 1716. John Harrison, qui fabriqua en 1727 l'horloge pendule le plus précis de l'époque, ne perdant qu'une seconde par mois, se lança aussi à la poursuite de ce prix. Il fabriqua deux chronomètres marins entre 1730 et 1735 (H1 et H2) utilisant deux boules avec des ressorts comme oscillateur, n'étant plus dépendant la gravité ni du mouvement du navire. Le problème de la température persistait cependant et rendait les horloges pas assez précises pour remporter le prix. C'est en 1761 qu'il présenta H4, un chronomètre marin très compact utilisant un tout autre mécanisme, ne respectant pas seulement les exigences pour gagner le prix, mais les dépassant largement. Il gagna

le prix promis par le *Longitude Act* plus tard grâce à cette horloge, alors qu'il était âgé de 80 ans et décéda trois ans plus tard. Ce chronomètre sera utilisé à bord des navires jusqu'à l'invention des montres utilisant des oscillateurs électroniques, plus de 100 ans plus tard[3][18][47].

Plusieurs autres personnes vont contribuer au développement des chronomètres marins, comme Pierre Le Roy, qui inventa en 1748 un nouveau type d'échappement (échappement par détente), qui sera fortement utilisé plus tard. Vers la fin du siècle, John Arnold et Thomas Earnshaw fournissait des chronomètres marins aux flottes marchandes ainsi qu'à la Royal Navy, ce qui contribua fortement à l'expansion de l'Empire britannique à l'époque[47].

L'avènement du télégraphe en 1837 permit la standardisation du temps dans un même pays. Avant, l'heure locale était basée sur le Soleil, ce qui faisait que l'heure était différente entre toutes les villes. Avec le télégraphe, il était donc possible de transmettre l'heure de ville en ville à grande vitesse, ce qui permit l'utilisation d'une même heure partout au Royaume-Uni dès 1855. Ceci était crucial, notamment avec l'avènement des chemins de fer, pour savoir l'heure de départ et l'heure d'arrivée des trains en fonction d'une seule heure. Les horloges de chaque ville étaient synchronisées avec l'heure de l'observatoire de Greenwich, à Londres, ce qu'on appela le *Greenwich Mean Time* (GMT). Une telle prouesse était moins pratique aux États-Unis à cause de la grande superficie du pays. On sépara donc celui-ci en quatre fuseaux horaires[14].

6 Les horloges électriques et au quartz : de plus grandes fréquences utilisées

6.1 Les horloges électriques

Vers 1815, un inventeur anglais du nom de Francis Ronald développa une horloge électromécanique utilisant des piles sèches, n'engendrant pas de courant lorsque disposé dans un circuit (par opposition aux piles de Volta), pour faire fonctionner son oscillateur. Ce genre de pile possédait un temps de vie beaucoup plus grand que les piles de Volta, ce qui en faisait un choix intéressant pour mesurer le temps. Cependant, l'efficacité de ces piles dépendait beaucoup de la température ainsi que de l'humidité, ce qui ne rendait pas l'instrument très utile. Dans les conditions idéales, cependant, l'horloge possédait une précision allant jusqu'à perdre une dizaine de secondes sur quelques jours, ce qui était un résultat plutôt respectable pour l'époque[41].

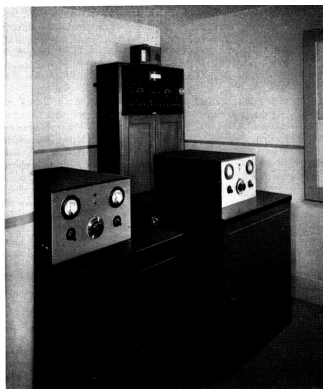
Un peu plus tard, en 1941, l'inventeur écossais Alexander Bain déposa un brevet pour la première horloge étant alimentée par un courant électrique. Bain est une figure très méconnue des historiens des sciences, malgré ses grandes contributions en télégraphie et en horlogerie électrique. Dans son brevet de 1941, il prédit la plupart des applications de l'électricité à l'horlogerie. Il sera récompensé dix ans plus tard, alors qu'il recevra la médaille de la Grande Exposition pour ses travaux. Le principe de ses horloges sera à la base des horloges électriques jusqu'à l'apparition des horloges au quartz vers 1930[7].

6.2 Les horloges au quartz

L'apparition des horloges au quartz est possible grâce à la découverte de la piézoélectricité par Pierre et Jacques Curie en 1880. Ils observent que certains matériaux, lorsque déformés, accumulent des charges sur certaines de leurs surfaces. Inversement, un matériau soumis à un courant électrique va se déformer.

Il est donc possible de faire vibrer ce matériau en fonction du courant induit. Le premier oscillateur au quartz a été construit par Walter J. Cady en 1921. Le cristal de quartz (SiO_2) a été choisi pour ses propriétés piézoélectriques, ainsi que pour sa faible déformation due à la température, ce qui était un problème majeur pour à peu près toutes les horloges mécaniques inventées auparavant. Lorsque taillé adéquatement, notamment en forme de diapason, il est possible de faire vibrer le quartz à la fréquence très précise de 32 768 Hz (2^{15} Hz), qui est une fréquence intéressante, premièrement parce qu'il s'agit d'une puissance de deux, ce qui facilite le comptage d'oscillations, deuxièmement car cette fréquence est assez élevée pour être inaudible à l'oreille humaine, puis, finalement, parce que cette fréquence n'est pas trop élevée pour rendre le compteur d'oscillation trop coûteux[29].

La première horloge au quartz a été fabriquée par Warren Marrison et J.W. Horton aux Bell Telephone Laboratories en 1927. Cette nouvelle technologie était très prometteuse et il a même été possible de mesurer la variation dans la période de rotation de la Terre en 1932 grâce à celle-ci. En 1967, les premiers prototypes de montres utilisant un oscillateur au quartz ont fait leur apparition. La compagnie Centre Électronique Horloger a paru le modèle Beta 1, puis Seiko a produit son modèle Astron. Aujourd'hui, les horloges au quartz sont les types d'horloges les plus répandus au monde, notamment grâce à de grandes avancées en physique de la matière condensée, qui a rendu la technologie abordable et accessible. C'est ce genre d'horloge qui est utilisé non pas seulement dans les montres et les horloges, mais aussi dans les ordinateurs et autres produits électroniques. Certaines horloges au quartz peuvent aujourd'hui être ajustées au temps atomique international une fois et ne pas avoir à être réajustées au cours de leur vie[45].



(a) Deux des quatre oscillateurs au quartz du Bell System Frequency Standard[29].



(b) Crystal de quartz en forme de diapason utilisé dans les montres au quartz de nos jours[6].

Cependant, puisque la fréquence d'oscillation du cristal de quartz dépend de la forme du cristal, entre autres, aucun cristal ne peut vibrer *exactement* à la même fréquence qu'un autre. De plus, la principale cause de perte de précision d'une horloge au quartz est le changement de température ainsi que le vieillissement du cristal. Ces limitations rendent l'utilisation de l'horloge au quartz inadéquate dans

certains cas précis, notamment pour des mesures scientifiques[26].

7 Les horloges atomiques : vers une précision absolue

Les avancées en physique subatomique vers la moitié du XX^e siècle ont permis l'élaboration d'un nouveau type d'horloges, plus précises que toutes celles développées auparavant : les horloges atomiques. L'idée d'utiliser la fréquence naturelle d'un élément a été tout d'abord stipulée par William Thomson (Lord Kelvin), proposant une unité de temps *absolue*, au lieu de la seconde basée sur la rotation de la Terre autour du Soleil. Il proposa l'utilisation des raies des atomes d'hydrogène ou de sodium, possédant des propriétés indépendantes de leur position dans l'Univers et ne changeant pas dans le temps non plus[48]. De plus, deux atomes d'un même élément sont identiques (s'il s'agit du même isotope), ce qui permet d'obtenir des fréquences identiques d'une horloge à une autre, ce qui n'était pas le cas avec les horloges précédentes.

La fréquence de résonance d'un atome entre deux niveaux d'énergie est définie par la formule $f_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$. En théorie, un atome est un oscillateur parfait. Cependant, en pratique, quelques limitations s'imposent. En pratique, un atome va absorber des photons d'une petite gamme de fréquences, qu'on appelle la largeur de résonance (notée Δf_a). Le facteur de qualité d'une horloge atomique est défini par $Q = \frac{f_0}{\Delta f_a}$, et on essaye de le maximiser pour obtenir une meilleure précision sur nos mesures. La fréquence f_0 dépend strictement du choix de l'élément utilisé dans l'horloge, et la largeur de résonance dépend plutôt du temps d'interaction avec un oscillateur externe, comme l'oscillation d'un cristal de quartz[26].

La première horloge atomique, développée en 1948 au National Bureau of Standards aux États-Unis (maintenant le National Institute of Standards and Technology) par Harold Lyons et quelques collègues, utilisait la raie d'absorption de l'ammoniac à $23870.1 MHz$ pour définir la seconde. La précision atteinte par cette horloge ne dépassait cependant pas celle des horloges au quartz de l'époque, mais cette horloge était le premier pas dans l'ère des horloges atomiques, établissant les fondations du principe de ces horloges[46].

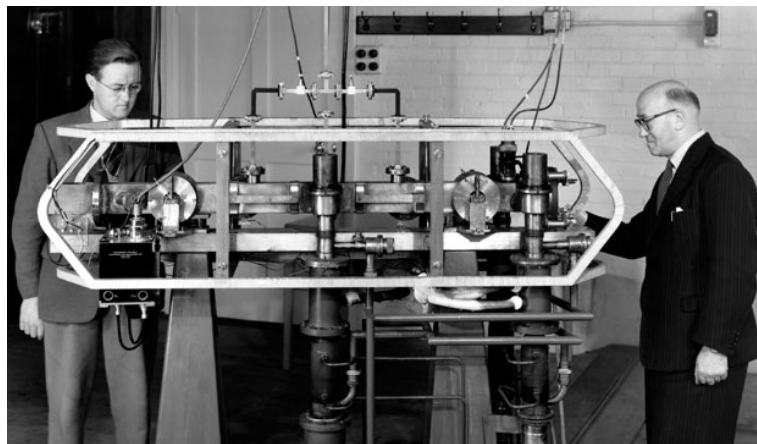


FIGURE 9 – Horloge atomique développée par Louis Essen et Jack Parry en 1955[36].

Un peu plus tard, en 1955, Louis Essen et Jack Parry, du National Physical Laboratory au Royaume-

Uni, bâtirent la première horloge atomique dépassant la précision obtenue par les horloges au quartz, se basant sur l'atome de césium Cs_{55}^{133} , un métal solide à la température de la pièce de la famille des alcalins[43]. La largeur de résonance de son appareil était alors de $340Hz$. La seconde, avant 1956, était définie comme une fraction du jour solaire moyen ($\frac{1}{86400}$ d'une journée). De 1956 à 1967, cette définition laissa sa place à une fraction de l'année tropique[11]. Puis, après 1967, le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), définit la seconde comme 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 $6S_{1/2}$ de l'atome de césium Cs_{55}^{133} [34]. Cette première horloge au césium permettait une précision inégalée par les horloges au quartz de l'époque, ne perdant que $10\mu s$ par jour. Cette nouvelle définition de la seconde fut majeure et secoua tout le domaine de la métrologie. En effet, suite à cette nouvelle définition de la seconde, et sachant que la vitesse de la lumière est constante dans tout référentiel, il était possible de définir une nouvelle définition pour le mètre basé sur l'unité de la seconde. D'autres unités dans le système international, comme le volt et l'ampère dépendent aussi maintenant de la définition de la seconde[26].

L'atome de césium 133 était un bon choix pour l'horloge atomique pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit d'un atome lourd, ce qui fait qu'il se déplace beaucoup plus lentement que, par exemple, l'hydrogène à la température de la pièce (≈ 130 m/s pour le césium 133 vs. ≈ 1600 m/s pour l'hydrogène), ce qui fait qu'il pourra rester beaucoup plus longtemps dans la zone d'interaction avec l'oscillateur externe, diminuant ainsi la largeur de résonance. De plus, cet atome possède une plus haute fréquence de transition hyperfine (≈ 9.2 GHz) que d'autres atomes utilisés dans les horloges atomiques comme le rubidium 87 (≈ 6.8 GHz) et l'hydrogène (≈ 1.4 GHz). Le facteur de qualité associé à cet atome pouvait donc être augmenté par rapport aux autres éléments facilement[26].

Surprenamment, la première horloge atomique commerciale fut disponible en 1956, seulement un an après l'horloge de Essien et Parry. Cette horloge, nommée Atomicron, a été développée par la National Company of Maiden, MA et sa confection a été dirigée par le professeur Jerrod Zacharias du MIT. La National Company a vendu environ 50 horloges atomiques de 1956 à 1960 et presque toutes les ventes ont été faites à l'armée américaine. En 1964, Hawlett Packard a aussi confectionné une horloge atomique commerciale, beaucoup plus compacte que l'Atomicron[26].

Au fil des années, le NBS a produit plusieurs horloges atomiques utilisant le principe de faisceau à césium (*cesium beam*), la première étant le NBS-1, puis le NBS-2 jusqu'au NBS-6, puis le NIST-7, alors que le nom de l'organisme changea, toujours en gagnant beaucoup de précision entre les modèles. Plus tard, des techniques de refroidissement par laser pour ralentir les atomes de césium ont fait apparaître une nouvelle sorte d'horloges atomiques : les horloges atomiques à fontaine de césium. Le fait de ralentir les atomes permettait de diminuer les fluctuations thermiques ainsi que de prolonger le temps d'interaction

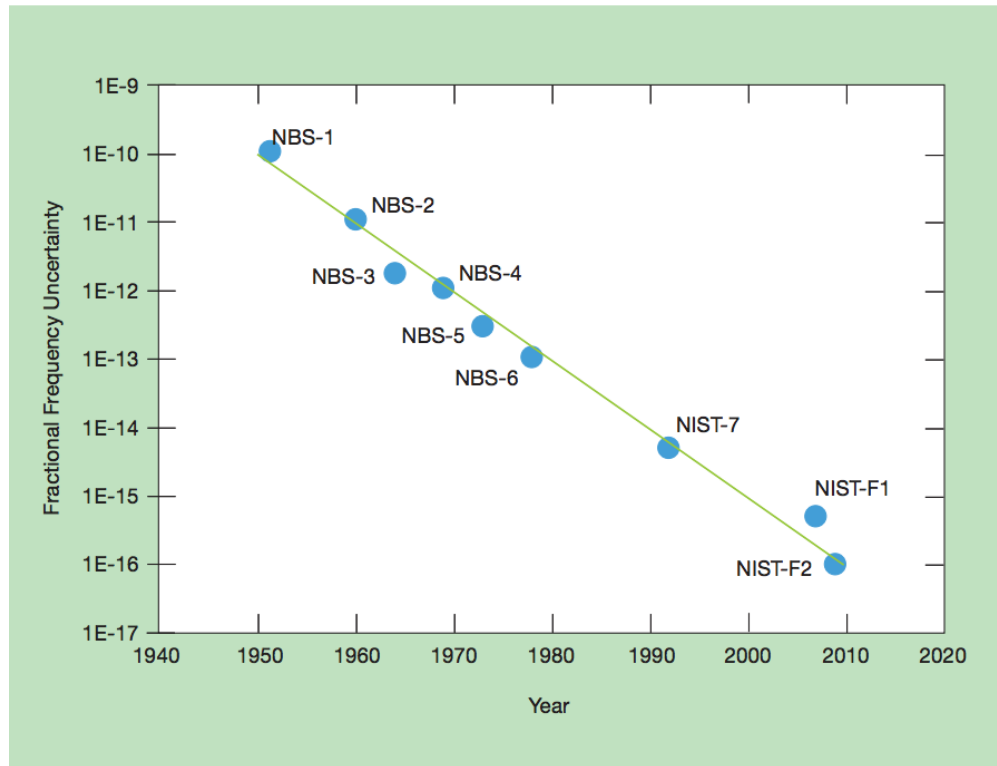


FIGURE 10 – Évolution de l’incertitude sur la fréquence du césium en fonction de l’année d’introduction des horloges atomiques construites par le National Institute of Standards and Technology[26].

avec l’oscillateur externe, augmentant encore une fois le facteur de qualité des horloges[11]. Le NIST a ensuite produit, au cours des années 2000, le NIST-F1 et F2, gagnant encore de la précision sur les horloges précédentes[26].

Plusieurs autres types d’horloges atomiques ont fait leur apparition un peu partout dans le monde, notamment des horloges à ions ainsi que des horloges optiques au Strontium[34]. Cette course à la précision sans fin peut bien sembler inutile à première vue, mais elle est cruciale pour tester les lois de la physique acceptées aujourd’hui. De plus, les avancées dans ce domaine ont permis l’avènement des GPS, qui réglaient encore une fois le problème de la longitude, qui a causé tant de problèmes au cours du 18e siècle.

8 Conclusion

L’évolution de la mesure du temps de 5000 av. J.C. jusqu’à aujourd’hui a été le fruit de plusieurs centaines de personnes, amenant chacune des idées originales pour améliorer la précision de leurs mesures. Tout a commencé avec les premiers cadrans solaires, des instruments des plus simples qui soient, permettant de donner l’heure de la journée en fonction de la position de l’ombre engendrée par le gnomon, puis les inventeurs ont voulu régulariser la durée de chaque heure, qui n’était pas constante au début,

notamment avec des clepsydras de plus en plus compliquées pour obtenir un débit d'eau constant. Les horloges mécaniques furent un point tournant dans les instruments de mesure du temps, puisque ce sont les premières à avoir utilisé l'oscillation d'un corps pour mesurer les intervalles de temps, tout d'abord avec le pendule, puis avec la balance à ressort. L'amélioration de la précision de ces horloges a permis de régler le problème de la longitude, qui était un obstacle majeur lorsqu'en mer à l'époque. L'avènement des horloges utilisant l'électricité a permis d'améliorer grandement la précision des horloges avec l'apparition des horloges au quartz, qui sont le type d'horloges les plus largement répandus de nos jours, et qui possèdent maintenant une précision extrêmement grande pour un usage quotidien. Les horloges atomiques sont en quelque sorte l'apogée de cette course à la précision temporelle, ayant même permis à la seconde d'être redéfinie entièrement grâce à la fréquence de résonance d'atomes. Les différentes agences spatiales comme la NASA et l'agence spatiale européenne prévoient l'envoi d'horloges atomiques à atomes de césium refroidis en orbite pour permettre de tester les lois de la physique acceptées de nos jours, ainsi que pour recalibrer de temps des horloges atomiques à bord des satellites[8][11][34]. De plus, plusieurs laboratoires développent présentement un nouveau type d'horloge : les horloges optiques. On estime que celles-ci pourraient nous permettre d'obtenir une précision de l'ordre d'une seconde sur trois milliards d'années[39]. La course à la précision est donc autant présente aujourd'hui qu'elle ne l'a jamais été.

Bibliographie

- [1] Andrada, M., «A Brief History of Timekeeping», *SciShow*, [En ligne], 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=URK9Z2G71j8>
- [2] Audoin, C. & Guinot, B., *The Measurement of Time : Time, Frequency, and the Atomic Clock*, Cambridge University Press, New York, 2001, 335p.
- [3] Bader, Paul, «The Clock That Changed the World», *BBC*, [En ligne], 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=T-g27KS0yiY>
- [4] Betts, J.D., «Clepsydras», *Encyclopaedia Britannica*, [En ligne], 2007, <https://www.britannica.com/technology/clepsydra>
- [5] Bennett, M. et. al., *Huygens's Clocks*, Proceedings : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 458, No. 2019, 2002, 563-579.
- [6] Binglin, C., «Chinese scientists develop low-cost quartz 'super watch' technology», *South China Morning Post*, [En ligne], 2015, <http://www.scmp.com/lifestyle/technology/article/1697351/chinese-scientists-develop-low-cost-quartz-super-watch>
- [7] Burns, R.W., *Alexander Bain, a most ingenious and meritorious inventor*, Engineering Science and Education Journal, 1993, 85-93.
- [8] Centre National d'Études Spatiales, «PHARAO : The International Space Station's future cold-atom clock», *Centre National d'Études Spatiales*, [En ligne], 2016, <https://pharao.cnes.fr/en/PHARAO/index.htm>
- [9] Cotterell, B. & Kamminga, J., *Mechanics of pre-industrial technology : an introduction to the mechanics of ancient and traditional material culture*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, 325p.
- [10] Dhillon, V., «Solar Time», University of Sheffield, [En ligne], 2009, http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk/teaching/phy105/celsphere/stpete_sundial_15.jpg
- [11] Dimarcq, N., «La Mesure du Temps», *Institut d'astrophysique de Paris*, [En ligne], 2013, <http://www.planetastronomy.com/special/2014-special/05nov/Dimarcq-IAP.htm>
- [12] Doggett, L.E., «Calendars», *Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration*, [En ligne], 2012, <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhelp/calendars.html>
- [13] Douma, M., «Calendars through the Ages», *WebExhibits*, [En ligne], 2008, <http://www.webexhibits.org/calendars>
- [14] Douma, M., «First There Was Standard Time», *WebExhibits*, [En ligne], 2008, <http://www.webexhibits.org/daylightsaving/d.html>
- [15] Drake, S., *Galileo at Work : His Scientific Biography*, Courier Corporation, Chicago, 1978, 536p.
- [16] Gautschi, R. & Bickel, S., *A sundial found in the Egyptian Valley of the Kings*, Bulletin of the British Sundial Society 25 Vol. 4, 2013, 2-7.
- [17] Gerland, E. & Traumüller, F., *Geschichte der physikalischen Experimentierkunst*, Wilhelm Engelmann, Leipzig, Germany, 1899, p.182
- [18] Gibes, N., «John Harrison», *American Society of Mechanical Engineering*, [En ligne], 2012, <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/mechanisms-systems-devices/john-harrison>

- [19] Goodenow, J. et. al., «Mathematical Models of Water Clocks», *Rochester Institute of Technology*, [En ligne], 2007, <http://www.nawcc-index.net/Articles/Goodenow-WaterClocks.pdf>
- [20] Hébert E., Barbin E., *Instruments scientifiques à travers l'Histoire*, Ellipses, Paris, 2004, 496 p.
- [21] Hill, D.R., *Mechanical Engineering in the Medieval NearEast*, Scientific American, 1991, 64-69.
- [22] Johnston, S., «Rome revisited : the vertical disc dial», Museum of the History of Science, University of Oxford, [En ligne], 2013, <http://www.mhs.ox.ac.uk/staff/saj/roman/images/mhs-small.jpg>
- [23] Lalos, M., «Les cadrans solaires», Site personnel, [En ligne], 2016, http://michel.lalos.free.fr/cadrans_solaires/
- [24] Lewandowski, H., «Scaphé à oeillet», Musée du Louvre, [En ligne], 2000, http://www.louvre.fr/sites/default/files/imagecache/940x768/medias/medias_images/images/louvre-cadran-solaire.jpg
- [25] Lienhard, J.H., «The Hourglass», *University of Houston*, [En ligne], 1999, <http://www.uh.edu/engines/epi1469.htm>
- [26] Lombardi, M.A., Heavner, T.A. & Jefferts, S.R., *NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second*, The Journal of Measurement Science Vol. 2, No. 4, 2007, 74-89.
- [27] Mahoney, M.S., «Christian Huygens : The Measurement of Time and of Longitude at Sea», publié dans *Studies on Christiaan Huygens*, H.J.M. Bos, Lisse, 1980, 234-270.
- [28] Markowitz, W., et. al., *Frequency of Cesium in Terms of Ephemeris Time*, Phys. Rev. Lett. 1, 1958, 105-107.
- [29] Marrison, W.A., *The Evolution of Quartz Crystal Clock*, Bell Labs Technical Journal 27, 3, 1948, 510-588.
- [30] McCarthy, D.D. & Seidelmann, K.P., *Time : From Earth Rotation to Atomic Physics*, Wiley VCH, Weinheim, 2009, 351p.
- [31] Mensing, K., «The History of Keeping Time», *TED-Ed*, [En ligne], 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=74IOMORKNIE>
- [32] Mills, A.A, Day, S. & Parkes, S. *Mechanics of the Hourglass*, Eur. J. Phys. 17, 1996, 97-109.
- [33] Mintz, D., «Timekeeping in the Ancient World», *University of St Andrews*, [En ligne], 2007, http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/history/HistTopics/Water_clocks.html
- [34] Morin, H., «Métrologie : Gardiens du temps», *Le Monde*, [En ligne], 2009, http://www.lemonde.fr/planete/article/2009/10/02/metrologie-gardiens-du-temps_1248377_3244.html
- [35] National Institute of Standards and Technology, «A Walk Through Time : The Evolution of Time Measurement through the Ages», *National Institute of Standards and Technology*, [Archivé], 2002, <https://web.archive.org/web/20080305083041/http://physics.nist.gov/GenInt/Time/time.html>
- [36] National Physics Laboratory, «60 Years of the Atomic Clock», *National Physics Laboratory*, [En ligne], 2015, http://www.npl.co.uk/upload/img/essen-experiment_1.jpg
- [37] O'Connor, J.J., & Robertson, E.F., «Babylonian Numerals», *University of St-Andrews*, [En ligne], 2000, http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/HistTopics/Babylonian_numerals.html
- [38] O'Connor, J.J., & Robertson, E.F., «Regnier Gemma Frisius», *University of St-Andrews*, [En ligne], 2002, http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/Biographies/Gemma_Frisius.html
- [39] Oskay, W.H. et. al., *Single-Atom Optical Clock with High Accuracy*, Phys. Rev. Lett. 97, 020801, 2006.
- [40] Planchon, F. & CHARNOZ A., «La Mesure du Temps», *Université Nice Sophia Antipolis*, [En ligne], 2000, <http://users.polytech.unice.fr/~strombon/Formation/TL.2000/Groupe5/Horlogerie/Clepsydre.htm>

- [41] Ronalds, P.F., *Remembering the First Battery-Operated Clock*, Antiquarian Horology, 2015, 244-248.
- [42] Savoie, D., «Histoire de la gnomonique de l'Antiquité à nos jours», Académie des Sciences, [En ligne], 2015, http://public.weconext.eu/academie-sciences/2015-06-16/video_id_001/index.html
- [43] Somogyi, L. «TimeLine - A Brief Introduction To The History Of Timekeeping Devices», *SpotImageryLtd*, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=At5atF4mKiU>
- [44] State of New York, *Annual Report of the American Institute of the City of New York*, State of New York, New York, 1870, 1098p.
- [45] Stephens, C. & Dennis, M., *Engineering time : inventing the electronic wristwatch*, British Journal for the History of Science, Vol. 33, 2000, 477-497.
- [46] Sullivan, D.B., *Time and Frequency Measurements at NIST : The First 100 Years*, National Institute of Standards and Technology, Boulder, 2001, 4-17.
- [47] Thompson, D., «A Chronology of Clocks», *Anthony Gray Clocks*, [En ligne], [s.d.], <http://anthonygrayclocks.net/horological-timeline.htm>
- [48] Thomson, W. & Guthrie Tait, P., *Treatise on Natural Philosophy, Volume 1, Issue 1*, Cambridge University Press, Cambridge, 1879, 508p.
- [49] Van Helden, A., «Pendulum Clock», *The Galileo Project, Rice University*, [En ligne], 1995, <http://galileo.rice.edu/sci/instruments/pendulum.html>
- [50] Welbourne, E., «Robert Hooke's Inventions», *CHAOS*, [En ligne], 2005, <http://www.chaos.org.uk/~eddy/politics/Hooke.html>
- [51] Whitrow, G. J., *Time in History : Views of Time from Prehistory to the Present Day*, Oxford University Press, Oxford, 1988, 217p.
- [52] Yan, H. S., & Lin, T.-Y., *A Systematic Approach to the Reconstruction of Ancient Chinese Escapement Regulators*, ASME, 2002, 407-414.