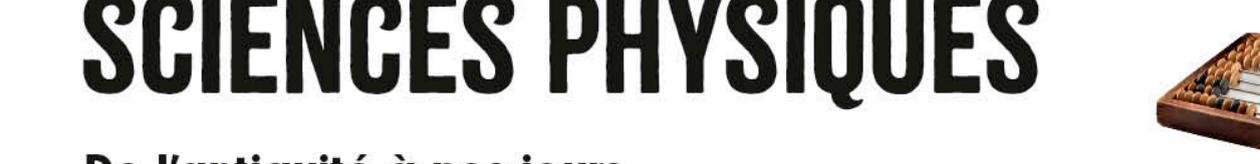




L'ÉVOLUTION DES OUTILS DANS L'HISTOIRE DES SCIENCES PHYSIQUES

De l'antiquité à nos jours



Matthieu Horgnies
Évelyne Darque-Ceretti
Éric Felder
Marc Aucouturier



LA MESURE DES GRANDEURS PHYSIQUES

I.1. Le temps

Le temps est la dimension dans laquelle se succèdent les événements. Sa mesure est très importante en sciences, par exemple si l'on veut caractériser la vitesse d'évolution d'un système.

Une prise de conscience liée à l'observation de la nature

L'observation de la nature a très vraisemblablement permis à l'homme de dégager très tôt ce concept : l'alternance du jour et de la nuit, l'évolution de la forme de la Lune, le mouvement nocturne des étoiles, l'alternance des saisons ont permis aux astronomes (également astrologues) de l'Antiquité d'établir des calendriers réglant la vie religieuse et sociale de leurs cités. Ainsi, la civilisation égyptienne (vers 2000 av. J.-C.) était rythmée par les inondations périodiques du Nil qui fertilisaient les champs et le calendrier égyptien comportait trois saisons : celle de la crue qui dure 4 mois, puis la saison des semailles et de la pousse des plantations et la dernière, celle des récoltes et de la sécheresse. Les civilisations antiques ont utilisé des calendriers basés sur les cycles lunaires et/ou solaires, mais la synchronisation des deux types de calendriers nécessite de grandes connaissances en astronomie. Dans ce domaine comme dans bien d'autres, ce sont les Grecs qui ont réalisé les travaux les plus achevés. Par exemple la découverte au

large du Péloponnèse près de la petite île d'Anticythère de fragments d'un mécanisme remarquable datant du II^e siècle av. J.-C. et son étude récente ont permis de déterminer que les Grecs avaient sans doute des moyens sophistiqués de calculer les positions astronomiques. La machine d'Anticythère est en effet dotée de plusieurs engrenages de roues dentées, (inventions d'Archimède (vers 287-212 av. J.-C.)) qui en gouvernent les mécanismes. Ayant adopté un calendrier lunaire de douze mois, les dirigeants grecs rétablissaient l'équilibre avec le cycle solaire en intercalant de manière judicieuse un treizième mois.

Sous la République, les Romains adoptent un calendrier composé de 12 mois de 30 jours et le Grand Pontife complète le cycle solaire en ajoutant à sa convenance des journées supplémentaires. Le Grand Pontife pouvait ainsi étendre le mandat des magistrats de son camp politique et réduire les mandats des magistrats du camp adverse. Le jour commence au lever du soleil et se termine à son coucher ; il est divisé en 12 heures diurnes. La nuit est elle aussi divisée en 12 heures qui sont donc de durée différente de celle des heures diurnes sauf à l'équinoxe. L'heure est elle-même divisée en 60 minutes et la minute en 60 secondes, un héritage des Babyloniens et de leur système de numération sexagésimale. En 45 av. J.-C., Jules César, avec l'aide d'un astronome, met de l'ordre dans ce système anarchique et impose le calendrier julien où l'année est composée de 12 mois alternativement de 30 et 31 jours (sauf le mois de février composé de 28 jours et les mois de juillet et août comprenant chacun 31 jours) pour un total de 365 jours. Le cycle solaire étant en fait de 365,2425 jours, César a introduit un jour supplémentaire tous les 4 ans, placé actuellement le 29 février des années nommées bissextiles. La différence entre 365,25 ainsi obtenue et 365,2425 est, depuis le pape Grégoire à la fin du XVI^e siècle, compensée par l'absence tous les siècles de ce jour supplémentaire. En effet, le calendrier julien qui suppose que l'année comprend 365,25 jours adopté par l'Europe chrétienne jusqu'à la fin du XVI^e siècle, produit un décalage progressif et très significatif à l'échelle des siècles par rapport au cycle solaire. La réforme grégorienne consista à effectuer un changement de date pour se recalculer sur le cycle solaire et à supprimer tous les siècles le jour supplémentaire en février des années bissextiles (apparition du calendrier grégorien).

Une multitude d'instruments de mesure du temps créés au fil des siècles

Comment l'homme a-t-il pu mesurer plus précisément l'écoulement du temps ? Les premiers instruments de mesure utilisent le mouvement apparent du Soleil par rapport à la Terre et l'évolution de sa hauteur au-dessus de l'horizon. Dès la plus haute Antiquité, on utilise dans toutes les civilisations le *gnomon*, un simple bâton (*style*) planté verticalement dans le sol. L'heure est déterminée à partir de la longueur et de la position de son ombre. Midi correspond au moment où la hauteur du Soleil est maximale et la longueur de l'ombre minimale. Un exemple de gnomon monumental est l'Obélisque de Montecitorio (*piazza Montecitorio*) à Rome qui a une hauteur de 30 mètres. Construit à l'époque du pharaon Psammétique II de la XXVI^e dynastie (594-589 av. J.-C.) et placé dans la ville d'Héliopolis ; il a été porté à Rome en l'an 10 par Auguste. Des graduations réparties régulièrement sur le sol permettent de déterminer l'heure avec une certaine incertitude, car la position du Soleil dans le ciel évolue au cours de l'année et dépend de la latitude du lieu d'observation (voir ci-après). Cet instrument se transforme progressivement en cadran solaire portable et orientable par insertion d'un style horizontal au milieu de la périphérie d'un récipient en forme de quart de sphère. Les Grecs améliorent grandement les cadrans solaires en les rendant coniques, en dirigeant le style vers l'étoile Polaire et en calculant les graduations, calculs tenant compte de la latitude du lieu et de la saison. Cette technique de mesure des heures ne sera améliorée que vers la fin du Moyen Âge avec un calcul plus précis des graduations, ce qui permettait la remise à l'heure des premières montres et horloges mécaniques, peu précises. L'inconvénient majeur des cadrans solaires est qu'ils ne peuvent fonctionner la nuit et par temps couvert.

L'autre grand instrument universel de mesure du temps est la clepsydre (horloge hydraulique). Le mot clepsydre vient du grec. Il est composé des mots *kléptein*, voler, et *húdôr* eau. De l'eau contenue dans un récipient supérieur dont le fond est percé d'un trou s'écoule dans un second récipient situé en dessous.

Des graduations permettent de déterminer la durée de l'écoulement. Notons l'existence de la Tour des Vents qui se dresse à l'extrémité de l'Agora romaine, à Athènes, au pied nord de l'Acropole. Il s'agit d'un bâtiment octogonal en marbre pentélique de 12 mètres de haut et de 8 mètres de diamètre. Vitruve attribue sa construction à l'architecte grec Andronicus de Cyrrhus, mais la date est débattue et oscille entre le II^e et le I^{er} siècle av. J.-C. Cette construction complexe associait une girouette, une représentation des huit principaux vents, des cadrans solaires et une clepsydre. La mise en œuvre pratique d'une clepsydre peut être très complexe, car la vitesse de l'écoulement d'un récipient dans un autre diminue au fur et à mesure que le récipient supérieur se vide. Un tel instrument permet potentiellement de déterminer des durées inférieures à une heure et fonctionne de jour comme de nuit. Mais il n'est pas utilisable en dessous de 0 °C et nécessite un recalage par rapport à la course du Soleil pour donner l'heure absolue. Les Grecs perfectionnèrent considérablement les clepsydres et réalisèrent, en multipliant les récipients et les trous, des clepsydres fournissant non seulement l'heure, mais aussi les principaux événements astronomiques : cycles lunaires, cours des planètes... Les clepsydres furent longtemps utilisées notamment dans l'Europe chrétienne jusqu'à l'invention d'horloges mécaniques précises.

Le sablier, symbole de l'écoulement du temps et de la mort dans les « Vanités », aurait été inventé au VII^e siècle. Il est composé d'un récipient supérieur de forme conique relié à son apex percé d'un petit trou rond à un récipient inférieur symétrique du récipient supérieur. L'ensemble est hermétiquement clos et contient une certaine quantité de sable. Il permet de mesurer le temps d'écoulement du sable du récipient supérieur dans le récipient inférieur. Il est moins précis que la clepsydre et il faut périodiquement renverser le sablier pour mesurer des temps longs, mais il peut fonctionner par grand froid et fut longtemps utilisé sur les bateaux pour mesurer l'écoulement du temps jusqu'à l'invention du chronomètre de marine (voir ci-après) ou pour régler les horloges mécaniques. Des sabliers sont toujours utilisés de nos jours pour mesurer le temps de cuisson d'un œuf à la coque, limiter le temps de réflexion d'un joueur...

Vers l'an 900 on commence à utiliser des bougies pour mesurer l'écoulement du temps. Le principe est très simple : on allume une bougie sur laquelle on a gravé des traits horizontaux et régulièrement espacés. On mesure ainsi la succession des intervalles de temps séparant le passage de la flamme au niveau des traits. Selon le même principe, les Chinois inventent l'horloge à encens où la bougie est remplacée par des bâtonnets d'encens. La fin de la combustion d'un bâtonnet, produit la chute d'une bille dans un récipient métallique et l'impact émet un son.

L'astrolabe est considéré comme le « roi des instruments mathématiques ». Astrolabe, en grec, signifie « preneur d'astres » du grec *astron*, astre, et *lambanein*, prendre. Il a une double fonction, à partir des astres, il permet de donner l'heure, de s'orienter. Le principe de sa construction repose sur une projection stéréographique de la sphère céleste sur le plan de l'équateur. C'est un instrument d'origine grecque : son invention est discutée, certains l'attribuent à Apollonius de Perge, géomètre et astronome du III^e siècle av. J.-C. Hipparque vers 150 av. J.-C. le perfectionne. Il est introduit dans le monde musulman au VIII^e siècle, où il devient un instrument important dans les sciences. Il apparaît au XI^e siècle en Occident. Il devient le symbole de l'astronomie : on le trouve sur de nombreux vitraux ou statues du Moyen Âge. Il est tellement à la mode qu'Héloïse et Abélard nomment leur fils Astrolabe !

Les premières horloges mécaniques apparaissent au XIII^e siècle dans l'Europe chrétienne. Un poids est attaché à une corde enroulée autour d'un axe horizontal sur lequel est montée une aiguille. La chute du poids entraîne la rotation de l'axe et de l'aiguille qui marque les heures. Du fait de cette invention, la durée de l'heure diurne devient égale à celle de l'heure nocturne et indépendante de la saison. Toutefois ce dispositif ne permet pas initialement une mesure très précise du temps, car la pesanteur impose au poids un mouvement accéléré, donc une rotation non uniforme de l'aiguille. Au fil des siècles, les horlogers vont essayer d'enrayer à intervalles réguliers le mouvement du mécanisme et inventer à cet effet divers types d'échappement mécanique. Cette quête trouve son aboutissement au XVII^e siècle quand Galilée (1564-1642) montre que la période d'oscillation d'un pendule est constante,

de l'ordre en France de 2 secondes pour une tige de longueur 1 mètre (selon le système métrique qui ne sera en vigueur qu'au début du XIX^e siècle). Au milieu du XVII^e siècle, Christian Huygens (1629-1695), mathématicien et astronome néerlandais, conçoit une pendule à balancier qui est réalisée par un horloger de La Haye. Par l'intermédiaire de roues crantées, le pendule interrompt périodiquement le mouvement de l'axe sur lequel est enroulée la corde à laquelle est suspendu le poids et l'énergie du choc associé entretient le mouvement du pendule. Émerveillés par le fonctionnement des horloges mécaniques, divers philosophes (notamment René Descartes) vont comparer l'homme et l'Univers tout entier à une grande horloge dont Dieu serait l'horloger. En parallèle se développe la réalisation de montres mécaniques dont les aiguilles sont mues par un ressort en acier enroulé selon une spirale. Un tel dispositif permet de rendre portable la mesure du temps, mais présente un inconvénient : le ressort se détend progressivement au cours de son déroulement et la force motrice décroît. Les horlogers trouvent une solution satisfaisante au XV^e siècle : le déroulement du ressort est freiné par l'enroulement sur un axe conique d'une fine chaînette ; la force de freinage dépendant du diamètre d'enroulement, elle décroît donc au cours du temps, assurant ainsi un mouvement uniforme des aiguilles.

Il existe un domaine où une mesure précise de l'heure était et reste primordiale : c'est dans la marine. En effet, se situer dans le temps peut aussi permettre de se situer dans l'espace et il est très important pour les navigateurs de se situer sur la surface de la Terre sous peine de faire naufrage sur des récifs ou des côtes inhospitalières. La position d'un lieu est caractérisée par sa latitude et sa longitude. Les plans parallèles au plan équatorial définissent sur la surface de la Terre les parallèles et la latitude est l'angle entre le plan équatorial et le rayon joignant le centre de la Terre au point M considéré. Ainsi le pôle Nord (Sud) est le point de latitude 90°N (90°S). Les plans passant par les pôles définissent les méridiens. La longitude est l'angle entre le plan méridien passant par M et un plan méridien de référence (le méridien de l'Observatoire de Greenwich au Royaume-Uni actuellement). La mesure de la longitude nécessite de comparer l'heure locale du point M à celle du méridien de référence. Si midi (12 heures)

du point M correspond à 11 heures (13 heures) au méridien de référence, le point M a pour longitude 15°E (15°O). Depuis l'Antiquité, on sait mesurer avec un astrolabe (de nos jours un sextant) la latitude à partir de la hauteur du Soleil à midi. Mais la détermination précise de la longitude est beaucoup plus délicate en l'absence d'horloges de grande précision et ne se déréglant pas dans les conditions de la navigation. On utilisait donc à cet effet un almanach décrivant l'heure de réalisation en un point précis de conjonctions entre la Lune et diverses étoiles. L'utilisation de pendules mécaniques est restée longtemps impossible, car les variations de température qui produisent des variations de dimension des éléments métalliques les font retarder ou avancer. En outre le système de lubrification des rouages était pollué par les conditions sévères de fonctionnement à bord des navires. En 1714, soucieux de faciliter le développement de sa marine marchande et militaire, suite à une recommandation d'Isaac Newton, le Parlement anglais fait voter le *Longitud Act* et promet de verser des sommes allant de 10 000 à 20 000 livres sterling (des sommes considérables pour l'époque) à toute personne fournissant des chronomètres permettant de déterminer la longitude à 1° - $1/2^{\circ}$ près. De 1726 à 1764, un horloger écossais autodidacte, John Harrison (1693-1776), construit cinq prototypes de chronomètre (H1 à H5) de plus en plus précis en combinant, pour la réalisation des mécanismes, des alliages ayant des déformations dues à la variation de la température différentes. Ses prototypes testés au cours de voyages maritimes lui permettent de toucher le prix de 10 000 livres, puis de 20 000 livres. Pour un voyage de deux mois, le chronomètre H5 n'introduit qu'une erreur de 5,2 secondes, soit une erreur sur la position de l'ordre de 2 km ! En 1770, un horloger français, Pierre Le Roy (1717-1785), fils d'un horloger connu Julien Le Roy et lui-même horloger attitré du roi Louis XV, améliore le chronomètre de Harrison et met au point un chronomètre d'une régularité inédite, équipé d'un échappement libre, d'un spiral isochrone et d'un balancier compensé qui permet de rendre la machine insensible aux secousses. Son rival Ferdinand Berthoud (1727-1807) envoyé à Londres par Louis XV pour y examiner les horloges de marine H1, puis H4 de Harrison, a le rare privilège d'être élu membre de la Royal Society. Il élabore les deux horloges marines n° 6 et n° 8 qui seront embarquées en 1768

sur la corvette l'Isis pour être testées lors d'un périple de 12 mois. Les résultats d'une précision exceptionnelle pour l'époque lui valent d'être nommé « horloger mécanicien du roi et de la marine ». Inventeur et horloger de génie, il est considéré comme l'inventeur de la chronométrie de marine en France.

Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, chaque localité avait son heure locale basée sur l'indication des cadrans solaires. Mais cet état de fait devient de plus en plus difficile à gérer et dangereux avec le développement des chemins de fer. En effet du fait d'erreurs de synchronisation, les accidents se multiplient, amenant les autorités à introduire une heure unique à l'échelle de pays comme la France ou le Royaume-Uni ou plusieurs fuseaux horaires dans les pays de grande étendue comme les États-Unis. La synchronisation des horloges se fait à l'aide de signaux électriques à partir d'un centre unique (l'Observatoire de Paris pour la France) équipé d'horloges les plus précises possibles. Bien que la destruction de la tour Eiffel fût prévue 20 ans après sa construction pour l'exposition universelle de 1889, elle fut gardée pour diverses raisons (émettrice et réceptrice d'ondes électromagnétiques). En particulier, elle servit de relais de l'Observatoire de Paris. De grandes antennes sont installées au sommet, des câbles partant du sommet atteignent la station souterraine située sous le Champ de Mars à environ 150 m du pilier est, qui est elle-même reliée à l'Observatoire de Paris par des câbles souterrains. À partir du 23 mai 1910, le service fonctionne régulièrement : tous les jours, à minuit, un signal horaire commandé par l'Observatoire est envoyé ; à partir du 21 novembre, un deuxième signal horaire est envoyé, chaque jour ouvrable, à 11 heures. Vers la fin du XIX^e siècle une conférence internationale choisit le méridien de l'Observatoire de Greenwich comme référence unique des divers fuseaux horaires et des longitudes. De nos jours le temps universel moyen est défini à partir des indications fournies par divers centres répartis tout autour de la planète et équipés d'horloges atomiques (voir ci-après).

En 1880, les frères Curie, Pierre (1859-1906) et Paul-Jacques (1855-1941) découvrent la piézoélectricité, (du grec *piézein*, presser, appuyer) c'est-à-dire la propriété qu'ont certains matériaux comme le quartz de développer des charges électriques lorsqu'ils