

Séance du 14 février 2022

Mesure du temps et des distances terrestres

Jean-Pierre NOUGIER

Professeur émérite à l'Université de Montpellier
Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS-CLÉS

Temps, clepsydre, horloge atomique, seconde, Galilée, chute des corps, télémètre, vitesse de la lumière, étalons, parallaxe, triangulation, géolocalisation.

RÉSUMÉ

Dans une première partie, on décrit différents instruments de mesure du temps, du gnomon à l'horloge atomique en passant par la clepsydre, les horloges à poids et les montres à quartz. La nécessité d'instruments de plus en plus précis et d'étalons de mesure universels est montrée, à travers les expériences sur la chute des corps de Galilée. C'est ainsi que la seconde, définie autrefois à partir de la durée du jour, l'est aujourd'hui à partir des transitions électroniques de l'atome de césium.

Il en a été de même pour les distances : évolution vers le système métrique, le mètre lui-même est défini aujourd'hui à partir de la vitesse de la lumière. De même les instruments de mesure ont évolué, du podomètre à la chaîne d'arpenteur puis à la télémétrie laser et au positionnement par GPS.

Ces évolutions techniques et scientifiques vont de pair avec des bouleversements sociétaux.

Nota : je remercie vivement Sydney H. Aufrère et Jean-Paul Legros pour d'utiles discussions et informations.

1. Introduction

Les mesures du temps et de l'espace sont indissociables. Lorsqu'on doit se déplacer, il est essentiel d'évaluer la distance à parcourir et le temps qu'il faudra pour effectuer le déplacement. Si vous demandez à un passant si la gare SNCF est loin, il pourra vous répondre : « non, c'est à 5 minutes d'ici », vous en conclurez que vous êtes à environ 500 m de la gare. Mais si, circulant en voiture, vous voyez un panneau indiquant que votre supermarché préféré se trouve à 5 minutes, vous en conclurez qu'il est à environ 5 km. On peut donc mesurer les distances en temps, à condition de connaître la vitesse de déplacement : les mesures de temps et de distances sont donc étroitement liées, par l'intermédiaire de la vitesse.

Je n'aborderai pas ici les problèmes conceptuels liés aux notions d'espace de temps, par exemple : le temps est-il une donnée intrinsèque dans laquelle est plongé notre Univers, ou bien a-t-il été créé avec notre Univers comme le pensait Platon [1] ? Existait-il dans d'autres Univers, si d'autres Univers existent, et si oui s'écoule-t-il comme dans

notre Univers ? Dans notre Univers, s'est-il toujours et partout écoulé de la même façon ? Notre Univers est-il infini ? Ou bien est-il fini et plongé lui-même dans un espace infini (ou non ?) contenant (ou non ?) d'autres univers ? [2].

Les notions intuitives d'espace et de temps étant ici admises *a priori*, je donnerai seulement quelques informations concernant leur mesure. Toute mesure consiste à comparer la quantité à mesurer à une quantité de base, une unité, appelée « étalon ». La science de la mesure, c'est-à-dire la métrologie, consiste donc à définir des étalons auxquels toute quantité peut être comparée, donc mesurée.

Le but de cette présentation n'est pas d'énumérer les différentes unités de mesure utilisées à travers les âges et les régions, le lecteur pourra pour cela consulter s'il le souhaite la référence [3]. J'essaierai plutôt, à travers quelques exemples, de montrer la nécessité d'effectuer des mesures de plus en plus précises et pour cela de définir des étalons universels.

2. Mesure du temps

2.1. Des balbutiements antiques au XX^{ème} siècle

La mesure du temps s'effectue en comptant le déroulement d'une séquence d'un phénomène régulier ou périodique (c'est-à-dire qui se répète à intervalles réguliers).

Les phénomènes périodiques les plus évidents qui sont apparus de prime abord à l'humanité ont été bien évidemment la succession des jours et des nuits, la succession des saisons, celle des quartiers de la Lune. Ainsi sont apparus les décomptes des jours, c'est-à-dire les calendriers, Lunaire et Solaire, puis à l'intérieur d'un jour le décompte des heures. Ces différents décomptes correspondaient aux différents besoins de la vie sociale. Ainsi coexistaient en Égypte [4] un calendrier lunaire avec une alternance de mois de 29 et 30 jours (d'ailleurs modifié au IV^{ème} siècle av. J.C. ([4] p. 29, §140), qui rythmait essentiellement l'année religieuse, et un calendrier civil de 365 jours comportant 12 mois de 30 jours plus 5 jours intercalaires (dits épagomènes), qui rythmait la vie administrative et les événements ordinaires, divisé en trois saisons de quatre mois initialement liés aux crues du Nil et aux cultures.

Jusqu'à l'orée du Moyen Âge [1], le temps est mesuré à partir du lever et du coucher du soleil, qui rythment la vie paysanne : la journée est divisée en 12 heures, la nuit aussi : la durée d'une heure n'est donc pas la même le jour et la nuit, et varie avec les saisons.

Les Babyloniens décident de diviser l'heure égyptienne en 3 600 secondes. Ainsi, la seconde est la $1/86400^{\text{ème}}$ partie du jour, mais sa définition précise dépendra des moyens techniques dont on dispose pour la mesurer. Tous les efforts consistent alors à améliorer la précision des mesures et à définir un étalon le plus constant et reproductible possible. On s'aperceva ainsi que la durée du jour solaire varie au cours de l'année, entre 23h 59min 39s et 24h 00min 30s, soit une variation totale de 51 secondes. En 1956, on définit la seconde comme une fraction du jour moyen, la moyenne étant calculée sur une année, ce qui revient à définir la seconde comme une fraction de l'année et non plus du jour, en pratique comme la $1/31\,556\,925,9747^{\text{ème}}$ partie de l'année au tropique !

2.2. Quelques appareils de mesure des temps anciens

Ainsi, la formalisation d'un concept physique dépend aussi des appareils de mesure dont on dispose pour le quantifier. Cette interaction incessante entre concept et mesure, entre théorie et expérimentation, est une donnée essentielle des progrès de la physique.

Il nous faut donc donner, ici, un bref aperçu des techniques de mesure du temps (figure 1).

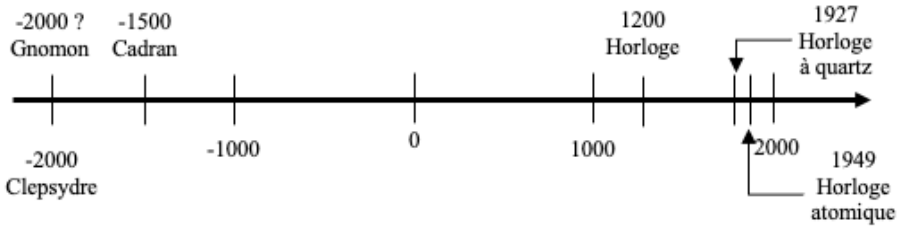


Figure 1 : Chronologie d'apparition des principaux instruments de mesure du temps

a) *Le gnomon :*

Le gnomon est l'un des plus anciens instruments servant à la fois à la mesure du temps et à des études astronomiques. Il s'agit d'un simple bâton planté verticalement dans le sol, dont la direction et la grandeur de l'ombre portée par le Soleil renseignent sur l'heure qu'il est, mais aussi permet de déterminer des constantes astronomiques telles que la latitude du lieu (voir ci-dessous § 3.2 a). On trouvera une étude très intéressante dans [5]. Il a été utilisé très tôt chez les babyloniens : le MUL.APIN est un texte cunéiforme, daté de 686 av. J.C., découvert à Ninive, regroupant sur trois tablettes toutes les connaissances accumulées à l'époque en astronomie mésopotamienne. Y sont présentés plusieurs schémas modélisant la variation de l'ombre portée d'un gnomon à différentes heures de la journée au cours de l'année. L'analyse de ces tablettes laisse à penser que le gnomon était utilisé dès le second millénaire av. J.C. ([6], page 4). Le gnomon a vu le jour en Chine semble-t-il à peu près à la même époque qu'à Babylone.

Un obélisque peut être utilisé comme gnomon, tel celui ramené par Auguste à Rome et installé sur le champ de Mars en 10 av. J.C., ou l'obélisque de la place de la Concorde à Paris, utilisé en l'an 2000 comme gnomon pour tracer un gigantesque cadran solaire [5].

Curieusement, cet instrument archaïque a été utilisé sur la planète Mars ! En effet, en décembre 2018, le bras robotisé de l'atterrisseur martien *InSight* a posé au sol le sismographe *SEIS*, qui a besoin, pour localiser les séismes détectés sur Mars, de connaître précisément son orientation. La planète Mars ne possédant pas de champ magnétique, contrairement à la Terre, la direction du nord géographique a été déterminée par un gnomon, constitué par une "poignée" de 27 mm de haut ayant aussi servi à saisir et déposer le sismographe *SEIS* [7].

b) *Le cadran solaire*

Vers 1500 av. J.C., on associe au gnomon une planche marquée de graduations, constituant les premiers cadrans solaires, qui, par la suite, connaissent des améliorations incessantes, en particulier au Moyen Âge. De l'Antiquité jusqu'au XXI^{ème} siècle, des cadrans solaires aussi sophistiqués qu'esthétiques fleurissent à travers le monde [8].

c) *La clepsydre*

Mais le soleil fait souvent défaut, par temps couvert et bien entendu la nuit. Apparus alors la clepsydre, vers -2000. C'était au début un simple vase rempli d'eau et percé d'un trou à la base, parfois muni de graduations. Mais au fur et à mesure que l'eau s'écoulait, la pression à la base diminuait, et avec elle le débit de l'eau, donc le niveau d'eau dans la clepsydre baissait moins vite à la fin qu'au début. Pour obtenir des graduations régulièrement espacées avec le temps, on a eu recours (figure 2) à des clepsydres de

forme conique [9], puis à des clepsydres à débit constant [10] (figure 3), qui donnèrent naissance aux horloges à eau.



Figure 2 : Clepsydre, Musée égyptien du Caire

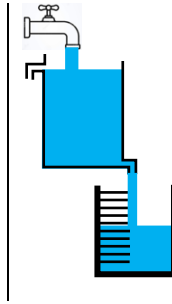


Figure 3 : Schéma de clepsydre à débit constant.

Le trop plein du réservoir supérieur assure un niveau d'eau constant, donc un débit constant vers le réservoir inférieur pourvu de graduations régulières.

Une variante de la clepsydre est le sablier, apparu au XII^{ème} siècle, qui utilise l'écoulement de grains de sable au lieu de l'écoulement des molécules d'un liquide. Cependant, alors que dans la clepsydre le débit de l'eau qui s'écoule varie avec la hauteur d'eau dans le réservoir, dans le sablier le débit de sable est régulier et ne dépend pas de la hauteur de sable.

Auparavant était apparu, vers l'an 900, la bougie graduée : la combustion de la mèche est régulière, la hauteur de la bougie permet donc de mesurer la durée de la combustion. Évidemment la précision est faible, car contrairement à ce qu'on croyait à l'époque, la vitesse de combustion varie d'une bougie à l'autre, et pour une même bougie suivant l'état de la mèche et les impuretés qu'elle contient, cependant elle était suffisante pour l'époque. Pour ces différents instruments, l'étalon restait le cadran solaire.

d) L'horloge

C'est, semble-t-il, au XIII^{ème} siècle qu'apparaissent les premières horloges à roues mues par un poids [11], grâce à l'invention de l'échappement, qui permet aux roues dentées (alors travaillées à la main et à la lime !) d'avancer de façon régulière et aux poids de ne pas accélérer leur mouvement dans leur chute (figure 4). Elles remplacent progressivement les horloges solaires ou hydrauliques. Comme tous les prototypes, elles coûtent très cher [12] et par conséquent restent l'apanage du clergé. Ces horloges sont au début très imprécises (il est courant qu'elles dévient de plus d'une heure en une journée) et monumentales (l'encombrement pouvait être de plusieurs mètres cube et le poids de plusieurs centaines de kgs). Elles sont donc installées dans les clochers et les beffrois [13]. Au début, elles ne comportent ni cadrans ni aiguilles, elles sont munies de carillons qui sonnent les heures [14], la première est installée à Milan en 1335. Elles contribuent largement à la division de la journée en 24 heures, et non plus à diviser le jour et la nuit en 12 heures, même si existaient déjà de grandes bougies qui mettaient 24 heures à se consumer.



Figure 4 : Mouvement de l'horloge astronomique de la cathédrale de Bourges (1424) par Jean Fusoris, serrurier André Cassart) [22]

Le passage à une division de la journée en 24 heures de durées égales, vers la fin du Moyen Âge, correspond au besoin de précision accrue des communautés urbaines et traduit donc un changement profond de mentalité : on est passé d'une définition agraire

à une définition urbaine, on est passé de l'heure des champs à l'heure des villes. Il s'agit là d'une véritable révolution culturelle, d'ailleurs la tradition a résisté, et l'on a longtemps, jusqu'au XIX^{ème} siècle dans certaines régions (Italie et Bohême en particulier), continué à faire débiter le décompte horaire à partir du coucher du soleil [1], avant de décompter les heures à partir de midi ou minuit.

À partir du XIV^{ème} siècle apparaissent les horloges dites astronomiques, qui en plus des heures affichent des informations astronomiques (positions du soleil, de la Lune, signes du zodiaque, etc.).

2.3. Les expériences de Galilée sur la chute des corps

Une autre révolution se dessine à la fin du Moyen Âge : le développement de l'esprit scientifique. Cet aspect peut être illustré par un immense génie, Galilée ; parmi son œuvre considérable, je m'attarderai sur la méthodologie qu'il a adoptée pour étudier quantitativement la chute des corps, et dont il ressort l'idée essentielle que la science doit se fonder sur le raisonnement, l'observation et l'expérience, et pas sur une idéologie.

Galilée voulait étudier la relation entre le temps et la distance parcourue en chute libre. Constatant qu'une pierre dans sa chute tombe de plus en plus vite, c'est-à-dire que son mouvement est accéléré, il fait l'hypothèse que cette accélération est uniforme, c'est-à-dire, en langage moderne, que la vitesse varie proportionnellement au temps [15]. Mais il ne disposait pas d'instrument lui permettant de mesurer le temps avec une précision suffisante. En conséquence, au lieu d'étudier la chute libre, il ralentit celle-ci en étudiant le mouvement d'une boule descendant le long d'une rainure d'un plan incliné (figure 5).

– Pour mesurer le temps de descente, il utilise une clepsydre constituée par un grand sceau plein d'eau, et il pèse la quantité d'eau recueillie dans un petit verre pendant la descente de la boule sur une distance donnée : les masses mesurées sont proportionnelles au temps mis par la boule pour parcourir ce chemin. Il obtient ainsi la relation entre la position et la durée du mouvement.

– Mais Galilée ne se contente pas de ce résultat : pour s'en assurer, il recommence ses mesures en 1609 en utilisant une autre méthode. Le long du plan incliné où il fait descendre sa boule, il dispose des arceaux munis de clochettes (figure 5), dont il peut régler la position le long du plan incliné.

Lorsque la boule est lâchée en haut du plan incliné, elle fait tinter les clochettes en passant sous les arceaux : Galilée règle la position des arceaux de façon que les clochettes tintent à intervalles de temps régulier, et il note les distances parcourues pendant ces intervalles de temps. Dans les deux cas, il trouve que les distances parcourues sont proportionnelles au carré du temps mis pour les parcourir : le mouvement est bien uniformément accéléré.

On notera toutes les précautions prises par Galilée pour vérifier ses hypothèses ainsi que ses résultats. Cette prudence est toujours de mise en recherche scientifique.

2.4. Vers la démocratisation et la précision

Le paragraphe précédent a mis en lumière la nécessité de disposer d'appareils de mesure précis, ce qui ne peut pas se faire sans la référence à des étalons de mesure



Figure 5 : Dispositif imaginé par Galilée pour étudier la chute des corps (Musée Galileo Galilei, Florence)

indiscutables. En 1656, le physicien Christian Huyghens (1629-1695) s'intéresse au pendule : il en élabore la théorie et a l'idée de l'utiliser comme organe régulateur pour les horloges. En 1657, Salomon Coster utilise ce principe pour réaliser un mouvement d'horlogerie. Vers 1700, l'horlogerie atteint son apogée, les horloges dévient de seulement une seconde par jour. Avec la révolution industrielle, les horloges de clocher ou de beffrois ne suffisent plus, l'industrie impose la ponctualité, apparaissent les montres mues par des ressorts à spirale.

Par ailleurs, à partir du milieu du XIX^{ème} siècle, on étudie des ondes de fréquence de plus en plus élevée, nécessitant des mesures de plus en plus précises, donc un étalon de plus en plus précis et stable. Donnons un exemple schématisé : supposons que nous désirions mesurer un phénomène qui dure environ 1/100 de seconde ; si nous disposons d'un pendule qui bat la seconde (c'est-à-dire qui effectue une oscillation en une seconde), il est quasiment impossible d'apprécier le 1/100 de seconde ; si nous disposons d'un système qui oscille à une fréquence de 1000 Hz (c'est-à-dire qui effectue 1 000 oscillations par seconde), il sera facile de compter 10 oscillations dont la durée totale est de 1/100 de seconde. Ainsi, plus rapide est la fréquence d'oscillation, plus précise est la mesure du temps.

En 1880, est découvert l'effet piézoélectrique : certains cristaux, en particulier le quartz, créent un champ électrique lorsqu'ils sont comprimés, et inversement se compriment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Ceci permet de réaliser des résonateurs à quartz, de fréquence ajustée à 32768 Hz, très stables (la précision est de l'ordre de 1 seconde sur une semaine). La première horloge à quartz a été conçue aux laboratoires de la société Bell en 1927. La miniaturisation des composants électroniques a permis, depuis 1968, de construire des montres à quartz, précises et actuellement très répandues.

Mais cette précision est encore insuffisante, non seulement pour les scientifiques, qui dans certaines conditions ont besoin de mesurer des phénomènes dont la durée est de l'ordre de la femtoseconde (soit 10^{-15} seconde, c'est-à-dire un millionième de milliardième de seconde !), mais aussi pour "le commun des mortels", comme nous le verrons au paragraphe 2.5 ci-dessous.

Jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle, le temps est toujours lié à la périodicité de la rotation de la Terre. Or rien n'est périodique dans le cosmos, ni dans le temps ni dans l'espace !

– Périodicité temporelle : la période de rotation de la Terre est le temps que met la Terre pour accomplir un tour complet sur elle-même, dans un repère fixe : c'est le jour sidéral, c'est-à-dire le temps qu'il faut pour qu'un point donné de la Terre retrouve la même position par rapport à une étoile fixe (en pratique une étoile lointaine). Le jour que l'on prend en compte pour la mesure du temps est le jour solaire, c'est-à-dire la durée séparant deux instants successifs où le Soleil passe au zénith. La figure 6 représente la Terre (en bleu) à trois instants sur sa trajectoire autour du Soleil. À l'instant 1, le point P de la Terre occupe la position P₁ alignée avec le centre du soleil et une étoile lointaine vers la gauche de la figure. À l'instant 2, la Terre a effectué un tour sur elle-même, et s'est déplacée sur sa trajectoire autour du Soleil, P₁ est venu en position P₂, P₂ voit l'étoile lointaine dans la même direction que P₁. Entre les instants 1 et 2, il s'est écoulé un jour sidéral. Un peu

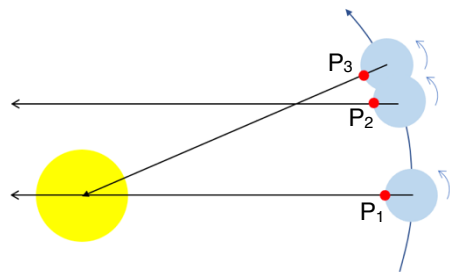


Figure 6 : Jour sidéral et jour solaire

plus tard, à l'instant 3, le point P occupe la position P_3 . Entre l'instant 1 et l'instant 3 il s'est écoulé un jour solaire (d'après [16]). On voit sur la figure 6 que Le jour solaire est plus long que le jour sidéral, à cause de la révolution de la Terre autour du Soleil. Or, la vitesse de déplacement de la Terre sur sa trajectoire varie au cours d'une année, parce que l'orbite de la Terre n'est pas circulaire, elle est (légèrement) elliptique : lorsque la Terre est plus près du Soleil (en janvier) elle va plus vite que lorsqu'elle en est plus éloignée (en juin), donc la durée du jour solaire varie au cours de l'année. Le tableau 2 donne les variations du jour solaire au cours de l'année 1998 [16].

11 févr.	26 mars	14 mai	19 juin	36 juillet	16 sept.	3 nov.	22 déc.
0	-18,1	0	+13,1	0	-21,3	0	+29,9

Tableau 2 : variations (en secondes) de la durée du jour solaire par rapport à 24 heures, au cours de l'année 1998 [16]

De plus, la vitesse de rotation de la Terre diminue (essentiellement à cause des marées provoquées par l'attraction de la Lune), provoquant un allongement de la durée journalière de 1,8 ms par an [17]. On voit donc que la rotation de la Terre n'est pas tout à fait périodique, elle ne constitue pas un étalon de temps suffisamment précis aujourd'hui.

– Périodicité spatiale : la Terre tourne autour du Soleil, celui-ci autour de notre galaxie, qui elle-même voyage dans l'Univers : en un an, la Terre parcourt près de 20 milliards de kms et ne revient donc pas à son point de départ.

L'évolution décrite ci-dessus a conduit à la nécessité de définir un étalon international de mesure de temps extrêmement précis et stable. Ceci a pu se faire grâce à la mécanique quantique, qui régit le mouvement des particules au niveau atomique. En effet, cette théorie nous enseigne en particulier qu'un électron d'un atome ne peut, lorsqu'il est dans un état stable, posséder que l'une des énergies parfaitement définies $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n, \dots$, il ne peut pas se trouver dans un état d'énergie intermédiaire. Lorsqu'un électron passe d'un niveau d'énergie E_2 à un niveau d'énergie $E_1 < E_2$, il cède l'énergie $E_2 - E_1$ en émettant une onde électromagnétique de fréquence ν telle que : $E_2 - E_1 = h\nu$. Les fréquences émises par les électrons de nombreux matériaux ont été analysées et mesurées. Un matériau particulièrement intéressant est le Césium 133, pour lequel existent deux niveaux d'énergie particulièrement stables entre lesquels la fréquence d'émission a été mesurée égale à 9 192 631 770 Hz (soit un peu plus de 9 milliards d'oscillations par seconde). En 1967, la Conférence Internationale des Poids et Mesures a décidé de *définir* la seconde à partir de cette fréquence d'oscillations : « *La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins $F=3$ et $F=4$ de l'état fondamental $6S\frac{1}{2}$ de l'atome de césium 133* ». Ainsi, cette fréquence de radiation n'est plus *mesurée* égale à 9 192 631 770 Hz, elle est *par définition* égale à cette valeur.

2.5. Horloge atomique

Une horloge atomique est un système qui mesure le temps à partir des transitions énergétiques entre les électrons des atomes du matériau utilisé pour constituer l'horloge (ce peut être le césium 133 par exemple, ou tout autre matériau stable), c'est-à-dire qui utilise la relation $E_2 - E_1 = h\nu$.

L'horloge la plus précise du monde est située au National Institute of Standard and Technology (NIST), elle dévie de 1 seconde en 15 milliards d'années ! Les horloges atomiques commercialement disponibles (on en trouve à partir de 1 000 €) ont une précision qui peut être meilleure qu'une seconde tous les trois millions d'années ! En fait, de nombreuses activités modernes nécessitent des précisions considérables dont peu

de gens ont conscience (synchronisation des réseaux de communication, transactions bancaires, mesure de gravité, etc.) : nous le montrerons ci-dessous en détail en étudiant la géolocalisation (§ 3.2 f).

L'ensemble de ces applications nous montre que les horloges atomiques ont révolutionné notre rapport au temps : il ne bat plus au rythme de la rotation de la terre mais au rythme de l'atome de césium 133, il a délaissé l'astronomie et la mécanique classique pour la mécanique quantique !

3. Mesure des distances

3.1. Vers le système métrique

Les « mesures de référence », que nous appelons aujourd'hui « étalons », sont très vite apparues pour éviter les contestations entre parties prenantes, dans les tractations commerciales en particulier. Tel est le cas des poids étalons mésopotamiens et égyptiens, ou des étalons de distance telle par exemple la coudée royale dite de « Maya » de l'Égypte ancienne ([18] page 56) (figure 7).



Figure 7 :

Coudée de Maya
(ministre des finances du
roi Toutankhamon
(1336-1327 av. J.C.)).

Cette coudée de 52,3 cm
est divisée en 28 "doigts"
de 1,86 cm, eux-mêmes
fractionnés par demis
(9,3 mm) et par
seizièmes (1,16 mm).
Musée du Louvre (AE N
1538), daté de 1350 av.
J.C. environ.

Les premiers étalons de mesure de longueur se référaient à des longueurs "naturelles" : pied, pouce, coudée, et pour les distances plus grandes stade, lieue, etc. On pourra constater, en consultant la référence [3] par exemple, le nombre considérable d'unités de mesure des longueurs en France, et plus généralement dans le monde. Ainsi, la taille d'un champ pouvait être mesurée en nombre de jours nécessaires à le récolter, ou encore en boisseaux pour quantifier la quantité de semences nécessaires. L'une des mesures les plus employées a été le pied, dont les longueurs varient d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre. Ainsi la toise française mesure six pieds de Roi ; la toise du Châtelet est un étalon qui fut construit en 1668 et scellé dans le mur extérieur du Grand Châtelet pour s'y référer ([18] page 370).

Une avancée considérable est la définition du système métrique (décret du 1^{er} août 1793 et loi du 18 germinal an III, soit 17 avril 1795), entériné par la convention du mètre où 17 états, le 20 mai 1875, créent le Bureau International des Poids et Mesures. Le mètre est alors défini comme la dix-millième partie du quart du méridien terrestre. Notons que, contrairement à une croyance répandue, l'idée de déterminer l'unité de longueur à partir du méridien terrestre, n'est pas née à la révolution française : c'est le mathématicien

chinois Liu Chuo qui en eut l'idée, au VI^{ème} siècle, et c'est l'astronome Yixing qui organisa la première mesure de 723 à 726 ([18] page 24). Le système métrique a remplacé quelque 800 unités de mesure alors utilisées en France, en réalité beaucoup plus, car à une même unité (par exemple le *pied*) correspondait des étalons de longueurs différentes suivant les régions et les cités.

De nombreuses réunions, conventions et décisions internationales, dont la dernière en date est la 26^{ème} conférence générale des poids et mesures tenue à Versailles les 13-16 novembre 2018, ont permis d'aboutir à l'adoption du système métrique, comme système de poids et mesure officiel, par tous les pays du monde sauf la Birmanie, le Libéria et les États-Unis [19] (ainsi les marins mesurent les distances en milles nautiques, les aviateurs calculent les altitudes en pieds,...).

Ce manque d'uniformité a conduit à de nombreuses et sévères déconvenues. Pour ne citer que quelques exemples parmi de nombreux autres [20] :

- La sonde "Mars Climate Orbiter" lancée en 1998 se place sur une orbite trop basse et se désintègre en 1999 dans l'atmosphère martienne [21] : les ingénieurs de la firme Lockheed, concepteurs de la sonde, avaient communiqué la poussée des micro-propulseurs en unités anglo-saxonnes (livre-force.seconde), tandis que le logiciel de l'équipe de navigation du Joint Propulsion Laboratory, qui recevait ces données pour les calculs des corrections de trajectoire, attendait des données en unités du système métrique (newton.seconde) conformément au contrat de sous-traitance : une mission de 327 millions de dollars anéantie.

- 15 avril 1999 : l'avion-cargo Mac Donnell Douglas MD-11F de la Korean Airlines (vol Ke 6316) décolle de Shanghai pour Séoul. Il reçoit l'ordre de la tour de contrôle de monter à 1 500 m d'altitude, puis de tourner à gauche en maintenant une altitude de 1500 m. L'ordre est transmis par le premier officier au commandant de bord de se maintenir à l'altitude de 1 500 pieds. Le commandant de bord entame une descente brutale, et perd le contrôle de l'appareil qui s'écrase dans une zone industrielle à 10 km de l'aéroport de Shanghai : 8 morts (3 membres d'équipage, 5 victimes au sol).

- 5 décembre 2003, Disneyland Tokyo : le dernier wagonnet de la "montagne spatiale" déraile en arrivant près du terminus, heureusement sans faire de victime. Les nouveaux boulons utilisés pour le montage ne faisaient que 1,25 cm de diamètre au lieu de 1,25 pouces prévus...

- En 2006, le satellite autonome DART (360 kg) est lancé par la NASA pour effectuer un arrimage automatique au satellite MUBLCOM (49 kg) en orbite circulaire circum-terrestre depuis 1999. La mise en orbite s'effectue normalement, l'arrimage se transforme en collision à petite vitesse (1,5 m/s), l'essentiel de la mission échoue : le GPS envoyait au vaisseau spatial des informations en unités métriques, l'ordinateur de bord du vaisseau les interprétait en unités anglo-saxonnes !

On voit donc l'impérieuse nécessité d'une part d'utiliser un système de mesure universel et stable, d'autre part de ne jamais communiquer des données sans préciser l'unité de mesure utilisée.

Comme on l'a vu pour la mesure du temps, il a donc été nécessaire pour les longueurs de définir des étalons de plus en plus précis, stables et universels. L'étalon finalement choisi pour la mesure des distances est la vitesse de la lumière c , dont la valeur la plus précise mesurée a été choisie comme valeur de définition du mètre, lors de la 17^{ème} réunion de la conférence générale des poids et mesures de 1983 : « le mètre est la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant une durée d'un 299 792 458^{ème} de seconde ». Ainsi, la vitesse de la lumière $c = 299\,792\,458$ m/s a été décrétée non pas comme étant le résultat d'une mesure, mais comme la valeur arbitrairement prise pour la définition du mètre.

3.2. Mesure des distances terrestres

a) Le podomètre

Pour la mesure de longues distances, on comptait jadis les pas d'humains ou d'animaux : les pas de chameaux étaient appréciés pour leur régularité ! Ainsi a été estimée la circonférence terrestre. La première mesure précise est due à Ératosthène (Aristote avait auparavant estimé la circonférence de la Terre à 400 000 stades, soit 60 000 km). Vers l'an 230 av. J.C., Ératosthène constata que, le 21 juin lorsque le soleil était au zénith, ses rayons étaient à la verticale à Syène (actuelle Assouan) : la lumière du soleil, lui a-t-on dit, pénétrait au fond d'un puits. Mais, à Alexandrie ils étaient inclinés (figure 8) d'un angle $\alpha = 7^{\circ}12' = 7,2^{\circ}$, soit $1/50$ d'un tour complet ($360/50 = 7,2$). Cet angle a été mesuré à l'aide de

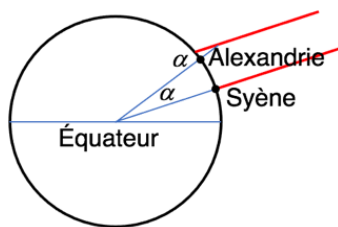


Figure 8 : mesure de la circonférence terrestre par Ératosthène

l'ombre portée d'un simple gnomon (on notera la précision de l'estimation d'Ératosthène : la différence de latitude entre les deux villes est en réalité de $7,13^{\circ}$ et non $7,20^{\circ}$, l'erreur est donc seulement de 1% !). Ayant estimé que la distance entre Alexandrie et Syène était de 5 000 stades, il en déduit que la circonférence de la Terre est de $50 \times 5\,000 = 250\,000$ stades. En prenant pour valeur le stade égyptien de 157,5 m, on obtient une circonférence méridienne de 39 375 km. La valeur exacte étant de 40 007,864 km, la précision est donc de 1,6 % ! Or, un simple coup d'œil sur le tracé du Nil et le relief de l'Égypte (voir figure 9) montre qu'il est hautement improbable que les chameaux se soient dirigés en ligne droite d'Alexandrie à Syène ! Alors, miracle ou prouesse ? Certainement les deux : la précision obtenue est miraculeuse [22], mais c'est certainement une prouesse que d'avoir eu l'idée et la capacité de mesurer la circonférence terrestre à l'aide d'un simple bâton planté dans le sol !

Cette méthode de mesure des distances peut sembler archaïque et sans aucun intérêt, détrompez-vous : c'est celle utilisée de nos jours par tous les joggers et plus généralement par tous les utilisateurs d'un téléphone "intelligent" (un "smartphone") équipé d'un podomètre faisant partie de l'arsenal des logiciels censés nous renseigner sur notre état de santé. Ce podomètre, tombé en désuétude au XX^{ème} siècle, est donc redevenu aujourd'hui une méthode "branchée" que presque tout le monde utilise !

b) L'odomètre

Pour mesurer les longues distances, alors que les bémates comptaient leurs pas ou ceux de leur monture, on utilisait aussi des odomètres mécaniques (on désigne par odomètre tout dispositif permettant de calculer la distance parcourue par un véhicule), capables de mesurer de longues distances avec une grande précision, de l'ordre du pour cent voire mieux [23], c'étaient probablement des charriots à roues munies d'un dispositif de comptage de tours par vis sans fin et engrenages, semblables aux compteurs



Figure 9 : Carte de l'Égypte

kilométriques de nos voitures [24]. L'odomètre mécanique a, semble-t-il, été inventé par Archimède, l'exact contemporain d'Ératosthène.

c) La chaîne d'arpenteur

Je désignerai par "chaîne d'arpenteur" tout système matériel permettant de comparer la distance à mesurer à un étalon, local ou national, qu'il se mesure en pied, en toise ou en mètre. Il pourra s'agir du double décimètre de nos écoliers, du mètre en bois utilisé par le tailleur, de la chaîne d'arpentage du géomètre, etc. Chacun sait mesurer une distance à l'aide d'un tel instrument gradué.

d) Parallaxe et triangulation

La détermination des distances et des positions (cartographie en particulier) s'est longtemps effectuée par mesures de triangulation. Le principe est celui de la vision binoculaire : c'est grâce au fait que nous observons un objet avec deux yeux distants l'un de l'autre de quelques centimètres, que nous pouvons apprécier le relief, c'est-à-dire déceler que tel objet est plus loin que tel autre : plus nos yeux convergent, et plus l'objet est près de nous. Le principe de la triangulation consiste donc à mesurer une parallaxe, c'est-à-dire la différence d'angles sous lesquels on voit un objet à partir de deux positions différentes. De façon plus précise (figure 10), pour déterminer la position d'un objet O , deux observateurs A et B distants de d , et dont les coordonnées sont connues, mesurent les angles α et β entre leur direction et la direction de l'objet O . Ces directions permettent de tracer les droites AO et BO , dont l'intersection donne le point O . Les distances $L_A = AO$ et $L_B = BO$ sont données par : $L_A = d \sin \beta / \sin(\alpha + \beta)$ et $L_B = d \sin \alpha / \sin(\alpha + \beta)$.

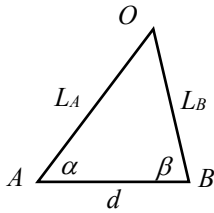


Figure 10 : Principe de la triangulation

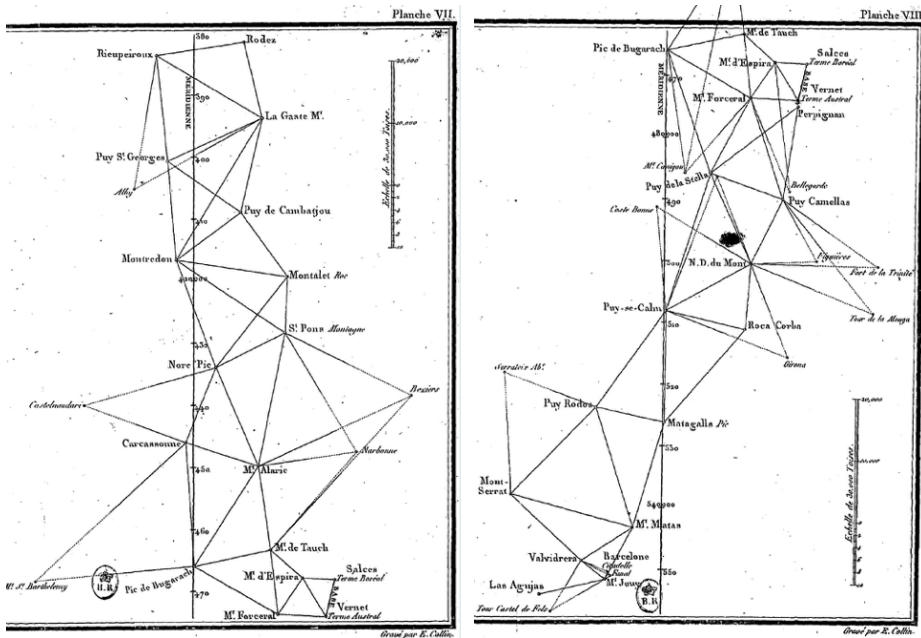


Figure 11 : Triangulation de la méridienne entre Rodez et Barcelone [25]

La précision des mesures d'angle est actuellement très grande, elle atteint typiquement 0,3 seconde d'arc (la seconde d'arc vaut $1/3600$ de degré), c'est-à-dire 1,5 mm à 1 km de distance. Avec des théodolites (appareils mesurant les angles), on peut positionner des objets distants d'une cinquantaine de kilomètres. On peut alors cartographier des zones par triangulation : le point O ayant été déterminé à partir de la base AB , un autre côté du triangle, par exemple AO , peut être utilisé pour déterminer un nouveau point P , et ainsi de proche en proche on peut mailler tout un territoire et le cartographier. Les différents points déterminés par triangulation sont des points remarquables du territoire : éléments particuliers du paysage, clochers d'églises, monuments caractéristiques, etc.

C'est ainsi qu'a été mesurée la circonférence du méridien terrestre pour définir le mètre étalon à la Révolution française. Sous l'impulsion de l'Académie Française, la distance Dunkerque-Barcelone a été déterminée par Delambre et Méchain lors de deux campagnes de mesures (1792-1793 et 1795-1798) d'où a été déduite la longueur du quart du méridien terrestre servant à définir le mètre (la précision des mesures d'angle était alors d'une seconde d'arc). La figure 11 est extraite du rapport de Delambre [25] et montre les triangulations effectuées entre Rodez et Barcelone.

e) Le télémètre laser

Le principe de la télémétrie laser est simple : une cible se trouve à une distance D à mesurer. Une impulsion lumineuse est envoyée sur cette cible, où elle se réfléchit. On mesure le temps t qui s'écoule entre l'émission de l'impulsion et son retour après réflexion sur la cible, la distance cherchée vaut : $D = ct/2$, où c est la vitesse de la lumière. Le même principe est utilisé pour la détermination des distances sous-marines avec les sonars, à ceci près qu'au lieu d'utiliser une impulsion lumineuse, on utilise une impulsion ultra sonore.

Le télémètre laser, d'emploi relativement récent, a vu son utilisation se généraliser dans tous les domaines : radars de vitesse, mesure de distances dans le bâtiment et les travaux publics, utilisation dans le domaine domestique (pour ces applications, en général on utilise une onde lumineuse émise par un laser et modulée en fréquence, au lieu d'une impulsion). On peut aujourd'hui se procurer un télémètre laser pour quelques dizaines d'euros.

f) Géolocalisation

Tout le monde utilise ou connaît le GPS (Global Positioning System, ou Géolocalisation par satellite) : c'est un système américain, mis en place en 1973 par le département de la défense, utilisant un système de 24 satellites placés sur 6 orbites circulaires, ainsi 12 satellites peuvent être vus à tout instant de chaque point de la Terre. Il est opérationnel depuis 1995 et ouvert au civil depuis 2000. Conscients de l'intérêt stratégique d'un tel système, l'Europe, la Russie, la Chine et l'Inde développent des systèmes concurrents [26]. Le système de l'Union Européenne, dénommé Galileo, d'un coût de l'ordre de 5 milliards d'euros, est opérationnel depuis décembre 2016, le nombre d'utilisateurs a dépassé le milliard en 2019 [27]. La précision de la localisation, pour l'utilisateur courant qui utilise son smartphone, est de l'ordre du mètre. Mais des services payants sont accessibles à des professionnels, qui permettent une localisation avec une précision allant jusqu'au centimètre !

La géolocalisation sert :

- Aux déplacements, à pied, en voiture, en bateau ou en avion (gestion du trafic aérien),
- Aux études géodésiques,
- À la cartographie par satellite,
- Aux études scientifiques (étude de migrations, déplacements, localisation d'animaux),

- À la conduite de systèmes d'armes (missiles tactiques, bombes, etc.). On voit en particulier, dans le domaine militaire, l'intérêt de disposer d'un système de géolocalisation qui ne dépende pas d'une puissance étrangère. Cela explique la raison pour laquelle tous les systèmes actuels [26] bénéficient d'un financement militaire, sauf Galileo bâti sur financements civils.
- En agriculture de précision, pour maximiser les rendements, augmenter la productivité, l'optimisation de l'utilisation des engrais et herbicides, ainsi que pour réduire son impact sur l'environnement,
- En secours en mer ou en montagne, où la localisation est opérée une dizaine de minutes seulement après le déclenchement de la balise de sauvetage.

Le principe de fonctionnement de la géolocalisation est le même que celui de la télémétrie laser, il consiste à mesurer un temps pour en déduire une distance. Un satellite *XX* envoie régulièrement des informations du type : « *je suis le satellite N°"XX", au prochain "top" je serai à telle position et il sera telle heure pour moi "TOP"* ». Le récepteur note l'heure de réception du "TOP", et à partir du décalage Δt entre l'heure d'émission et l'heure de réception du "TOP", calcule sa distance au satellite $D = c \Delta t$. La localisation se fait par triangulation à partir de 3 satellites, auxquels il faut ajouter un quatrième satellite pour corriger l'horloge du récepteur au sol dont la précision est en général médiocre. La lumière voyageant approximativement à 300 millions de mètres à la seconde, cela signifie qu'en un millionième de seconde, elle parcourt 300 m. Donc une erreur d'un millionième de seconde (soit 10^{-6} seconde) sur la mesure du temps entraîne une erreur de 300 m sur la position : si l'on veut avoir une précision de 3 m sur la position, il faut que l'erreur sur la mesure du temps soit inférieure à un centième de millionième de seconde (soit 10^{-8} seconde). À partir de stations au sol, on recale les horloges des satellites à chaque révolution ; un satellite accomplit un tour complet autour de la Terre en un temps de l'ordre de 12 heures (cela dépend de son altitude de croisière, environ 12 heures pour les satellites GPS, 13 heures pour les satellites Galileo). Il faut donc que les horloges des satellites varient de moins de 10^{-8} secondes en 12 heures, leur précision doit donc être meilleure que 1 seconde sur 12×10^8 heures, c'est-à-dire de 1 seconde sur 137 000 ans ! Si l'on souhaite une localisation avec une précision de 30 cm (la géolocalisation en agriculture nécessite une précision de quelques centimètres), il faut une horloge 10 fois plus précise, soit une déviation de 1 seconde sur 1 370 000 ans ! Seules les horloges atomiques sont capables d'une telle précision. Sans horloges atomiques, il n'y aurait pas de géolocalisation possible. Il n'y aurait pas non plus de géolocalisation possible sans la définition précise des unités de temps (la seconde par le césium 133), et de longueur (le mètre par la vitesse de la lumière).

Bien entendu, comme dans toute mesure, il y a des sources d'erreurs, le lecteur pourra s'en faire une idée en lisant par exemple les articles [28] et [29]. Une erreur systématique est liée à la théorie de la relativité [30].

On voit donc la nécessité d'utiliser des unités stables, précises et universelles.

4. Conclusion

Les nécessités scientifiques (par exemple l'étude de la chute des corps par Galilée) aussi bien qu'économiques (développement urbain au Moyen Âge par exemple, puis industrialisation au XIX^{ème} siècle, mondialisation des échanges, réseaux de communication, etc.) ont conduit à la mise au point d'instruments et d'étalons de mesure de plus en plus précis. Des instruments d'une précision extraordinaire sont maintenant à la disposition du public à des coûts très abordables (quelques milliers d'euros pour une horloge atomique, quelques dizaines d'euros pour un télémètre laser).

Parallèlement, ont dû être définis des étalons de mesure eux aussi de plus en plus précis, universels, stables et reproductibles. Autrefois construits à partir de notre environnement quotidien (longueur de la journée pour le temps ; pied, pouce, etc. pour les distances), puis reliés à notre planète la Terre (rotation de la Terre pour le temps, longueur du méridien terrestre pour les distances), ces étalons sont maintenant établis à partir de théories totalement étrangères au commun des mortels et inconnues de la plupart d'entre eux : la mécanique quantique via les transitions électroniques pour la définition de la seconde, la théorie de la relativité via l'invariance de la vitesse de la lumière pour la définition du mètre.

Et pourtant, on constate de façon apparemment paradoxale que des instruments rustiques et totalement archaïques connaissent de nos jours un regain d'intérêt surprenant : le gnomon utilisé dans une mission martienne, le podomètre présent dans tous nos smartphones !

Les nécessités technologiques induisent des besoins sociétaux qui bouleversent les habitudes et les comportements (passage de l'heure des champs à l'heure des villes, gestion des réseaux de communication, modification des déplacements grâce au GPS, etc.).

REFERENCES

- [1] Philippe Wolff, 1. Le temps et sa mesure au Moyen Âge, In: *Annales. Economies, sociétés, civilisations*, 17^e année, n° 6, 1962, pp. 1141-1145;
https://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1962_num_17_6_420927
- [2] La relativité restreinte par exemple nous enseigne que la perception du temps n'est pas la même dans deux repères en déplacement uniforme l'un par rapport à l'autre, la relativité générale nous dit que le temps dépend de la gravité du lieu où l'on se trouve : une grande vitesse "ralentit" le temps alors qu'une faible gravité "l'accélère". Et dans un trou noir, l'espace devient temps et le temps devient espace : les déplacements qui se faisaient dans l'espace deviennent temporels et inversement.
- [3] <http://www.mesures.org>. En cliquant par exemple sur "mesure des longueurs" dans la page d'accueil de ce site, on accèdera à 29 onglets (en bas de page), chacun donnant la liste des unités utilisées dans le pays correspondant, y compris dans l'Antiquité. Par exemple, on y trouvera environ 130 unités de longueur utilisées en différentes régions de France à différentes époques.
- [4] Richard A. Parker, The calendars of ancient Egypt, *Studies in ancient oriental civilization* n° 26, The University of Chicago Press, 1950 (disponible sur le site : <https://oi.uchicago.edu/sites/oi.uchicago.edu/files/uploads/shared/docs/saoc26.pdf>)
- [5] *Usages astronomiques du gnomon au cours des siècles* : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071318300919>
- [6] J.M. Steele, *Shadow-Lenght Schemes in Babylonian Astronomy*, *SCIAMVS* 14 (2013), 3-39 (article accessible sur le site : <https://www.academia.edu>)
- [7] <https://www.seis-insight.eu/fr/actualites/458-trouver-le-nord-sur-mars>
- [8] D. Savoie, *Recherches sur les cadrans solaires*, De Diversis Artibus (DDA 96 (NS 59)), ISBN 978-2-503-55298-9, 243 pages (2014).
- [9] <http://www.meridienne.org/index.php?page=clepsydre.historique>

- [10] Pour plus de précisions sur les différents types de clepsydres à débit constant et la loi d'écoulement de liquide dans les clepsydres, voir par exemple : <http://mesure-temps-tpe.e-monsite.com/pages/ii-la-mesure-du-temps-avec-la-clepsydre.html>
- [11] Gerhard Dohrn-van Rossum (trad. de l'allemand), *L'histoire de l'heure : l'horlogerie et l'organisation moderne du temps*, Paris, La Maison des Sciences de l'Homme, 1997, 464 p (ISBN 2-7351-0741-8).
- [12] On peut lire dans [11] (page 100) : « Dans le registre des réalisations d'un prieur méritant du chapitre de la cathédrale, à Canterbury, on note l'arrivée d'une "nouvelle grande horloge dans l'église" pour le prix considérable de trente livres (1292) ». Pour information : 30 livres à cette époque correspondent à environ 8 800 € de nos jours (source : <http://convertisseur-monnaie-ancienne.fr>).
- [13] Voir par exemple le Gros Horloge de Rouen, qui date du XIV^{ème} siècle (https://rouen.fr/sites/default/files/download/2019/fiches_pedagogique_gros_horloge-enseignants.pdf)
- [14] Le mot anglais *clock*, qui désigne une horloge, dérive du français *cloche*.
- [15] Il est intéressant d'observer combien le raisonnement et le discours d'une science à l'époque balbutiante étaient différents de la formulation moderne : « Enfin, dans cette étude du mouvement naturellement accéléré, nous avons été conduits comme par la main en observant la règle que suit habituellement la nature dans toutes ses autres opérations où elle a coutume d'agir en employant les moyens les plus ordinaires, les plus simples, les plus faciles. Car il n'est personne, je pense, pour admettre qu'il soit possible de nager ou de voler d'une manière plus simple ou plus facile que celle dont les poissons et les oiseaux se servent instinctivement. Quand donc j'observe qu'une pierre tombant d'une certaine hauteur à partir du repos acquiert successivement de nouvelles augmentations de vitesse, pourquoi ne croirais-je pas que ces additions ont lieu selon la proportion la plus simple et la plus évidente ? Or, tout bien considéré, nous ne trouverons aucune addition, aucune augmentation plus simple que celle qui toujours vient s'ajouter de la même façon. Ce que nous comprendrons aisément en considérant l'étroite affinité entre le temps et le mouvement : de même en effet que l'uniformité du mouvement se définit et se conçoit grâce à l'égalité des temps et des espaces (nous appelons un mouvement uniforme quand des espaces égaux sont franchis en des temps égaux), de même nous pouvons concevoir que dans un intervalle de temps semblablement divisé en parties égales des accroissements de vitesse aient lieu simplement ; ce qui sera le cas si par « uniformément », et, du même coup, « continuellement » accéléré nous nous représentons un mouvement où en des temps égaux quelconques se produisent des additions égales de vitesse », in Galileo Galilei, *"Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles"*, traduction Maurice Clavelin, PUF, 1995, 285 pages.
- [16] https://fr.wikipedia.org/wiki/Temps_solaire
- [17] [La durée du jour s'allonge alors que la rotation de la Terre ralentit](#) ; 13/01/2017 - www.notre-planete.info
- [18] Franck Jedrzejewski, *Histoire universelle de la mesure*, Ellipses, Paris, 2002 (ISBN 2-7298-1106-0).
- [19] Ainsi pour mesurer les longueurs, les américains utilisent, pour certains (dans 7 États) le "pied international", pour d'autres le "pied américain" qui vaut

- 1200/3937 = 0,3048006096 m. Au premier janvier 2023, tous les États américains devront adopter le pied international, fixé par convention depuis 1959 à 0,3048 m (<https://www.pourlascience.fr/sd/geosciences/les-etats-unis-changent-de-pied-19742.php>)
- [20] <https://www.podcastscience.fm/dossiers/2013/01/31/la-mesure-de-toute-chose-partie-1-pourquoi-il-nous-fallait-le-metre/>
- [21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter#Perte_de_la_sonde
- [22] Nul ne sait comment Ératosthène a estimé à 5 000 stades (soit 787,5 km) la distance entre Alexandrie et Syène (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Ératosthène>). En effet, cette distance par la route (ou par le Nil, la route suivant le cours du fleuve) est de 1085 km. En rectifiant les sinuosités du tracé du Nil, on aurait pu trouver une distance à vol d'oiseau de 839 km (soit 5327 stades). Mais, même la prise en compte de cette distance aurait été une erreur, car les deux villes ne sont pas situées sur un même méridien, Syène est à 303 km à l'est du méridien d'Alexandrie, et de fait la longueur de l'arc de méridien entre les latitudes de Syène et Alexandrie vaut 791 km, valeur très proche des 787,5 km estimés par Ératosthène : des erreurs grossières qui se compensent presque parfaitement, miracle !
- [23] <https://stringfixer.com/fr/Odometers>
- [24] <https://leg8.fr/empire-romain/les-voies-romaines/>
- [25] M. Delambre, *Base du système métrique décimal, ou mesure de l'arc du méridien compris entre les parallèles de Dunkerque et Barcelone, exécutée en 1792 et années suivantes, par MM. Méchain et Delambre*, suite des mémoires de l'Institut, tome premier, Paris, Baudouin, imprimeur de l'Institut national, janvier 1806, 744 pages. La figure 11 reproduit les planches 7 et 8 (pages 743 et 744), auxquelles on peut accéder sur le site : [https://fr.wikisource.org/wiki/Livre:Delambre, Méchain - Base du système métrique décimal, T.1.pdf](https://fr.wikisource.org/wiki/Livre:Delambre,_Méchain_-_Base_du_système_métrique_décimal,_T.1.pdf).
- [26] Actuellement, sont opérationnels les systèmes Américain (GPS, altitude 20200 km), Russe (Glonass, alt. 19100 km), Européen (Galiléo, alt. 23222 km), Chinois (Beidou, alt. 21528), de sorte que la désignation adéquate n'est plus GPS mais GNSS (Global Navigation Satellite System)
- [27] <https://www.20minutes.fr/high-tech/2769315-20200428-5-choses-que-vous-ignoriez-sur-galileo>
- [28] <http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~ddwit/gps/cours-GPS.pdf>
- [29] <http://www.aerofutur.com/pdf/CE/Le%20GPS.pdf>
- [30] La théorie de la relativité restreinte d'Einstein nous enseigne que, du fait que la lumière se propage à la même vitesse dans deux repères en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, les temps mesurés dans ces deux repères sont différents, ainsi à la vitesse à laquelle se déplace un satellite GNSS (de l'ordre de 14 000 km/h), son horloge retarde de $7 \mu\text{s}$ (microsecondes) par jour par rapport à une horloge au sol. La relativité générale nous enseigne que l'écoulement du temps est plus rapide là où la gravité est plus faible ; ainsi, les satellites GNSS voyageant à environ 20 000 km d'altitude, subissent une gravité moins importante qu'au sol, de sorte qu'en un jour l'horloge du satellite avance de $45 \mu\text{s}$ par rapport aux horloges terrestres. Au total, l'horloge d'un satellite GNSS avance de $45 - 7 = 38 \mu\text{s}$ en 24

heures. Afin de synchroniser les horloges des satellites GNSS et les horloges au sol, il faut donc régler les horloges des satellites GNSS de façon qu'elles retardent de $38 \mu s$ par jour. Un tel écart est aujourd'hui facilement mesurable, et constitue une preuve de validité des théories d'Einstein. Par ailleurs, une différence de $38 \mu s$ peut sembler minime, mais en une révolution satellitaire d'environ 12 heures, cela représente une déviation de $19 \mu s$, ce qui, à la vitesse de propagation de la lumière de $300 \text{ m}/\mu s$, se traduit par une erreur de $300 \times 19 = 5\,700$ mètres dans l'estimation des distances, ce qui est inacceptable. Il est donc indispensable d'effectuer cette correction si l'on veut mesurer des positions avec la précision requise.