

Les questions

Vous disposez d'un porte-documents devant vous permettre de répondre aux questions suivantes.

Documents 1 à 3

1. Quels commentaires la vidéo du document 1 appelle-t-elle ?
2. Quelle doivent être les caractéristiques essentielles d'un phénomène physique exploitable pour définir l'unité de temps ?
3. A l'aide des documents 2, expliquer en quoi LA définition de la seconde est essentielle. Quel(s) développement(s) a (ont) rendu la mise en place d'un « temps universel » nécessaire ?
4. Qu'y a-t-il de troublant dans le document 3 ? Comment l'interprétez-vous ?

Document 4

5. D'après vous, pourquoi la semaine compte-t-elle 7 jours ?
Astuces : Combien d'astres errants sont-ils visibles à l'œil nu ?
Combien de jours dure un cycle lunaire ? Combien de phases comporte-t-il ?
6. Combien de phalanges compte une main, pouce excepté ? Commenter la phrase en jaune.

Document 5

7. Qu'est-ce que la longitude d'un point sur Terre ? En quoi la possession d'une horloge adaptée et d'un moyen de connaître l'instant où le Soleil est au zénith permet-il de la déterminer ?
8. Quel problème le temps solaire vrai pose-t-elle dans le cadre de la définition d'un temps universel ?
9. Comment obtient-on le temps solaire moyen ? Pourquoi n'est-il pas plus adapté ? Comment l'utilise-t-on néanmoins comme temps universel à compter de 1884 ?
10. Pourquoi la définition du temps des éphémérides n'a-t-elle tenu que quelques années ?
11. Pourquoi l'atome représente-t-il un étalon de choix pour définir une référence *universelle* ?
12. Quelle est la dérive, en années, de la seconde donnée par une horloge dont l'exactitude atteint 10^{-17} ? La comparer à l'âge de l'Univers : si les lois de la Physique devaient évoluer avec l'Univers, la précision atteinte permettrait-elle de le constater sur une durée acceptable à l'échelle humaine ?
13. La précision actuelle sur la définition de la seconde a-t-elle des répercussions sur votre vie de tous les jours ? D'après vous, quelle est la précision d'une montre à quartz ? La correction de UT par les secondes intercalaires vous semble-t-elle problématique ?
14. Pour atteindre la précision de 1 m en géolocalisation, quelle est la précision nécessaire sur la mesure du temps ? Quelle précision peuvent permettre d'atteindre les systèmes de géolocalisation les plus précis à ce jour ? Quelle est pour le moment la difficulté rencontrée par ces systèmes ?
15. D'après le document 11, l'évolution de la précision des horloges sur quatre siècles a-t-elle été linéaire ou exponentielle ? En quatre siècles, combien d'ordres de grandeur ont-ils été gagnés en termes de précision ?

Synthèse : la frise récapitulative.

La vitesse de la lumière dans le vide est de $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: quelle serait l'incertitude sur la localisation si nous ne disposions pas des trois dernières décimales de cette constante fondamentale ?

Le porte-documents

Document 1 : soyons d'accord

« [L'auteur évoque le temps] *Qui pourra le définir ? Et pourquoi l'entreprendre, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant de temps, sans qu'on le désigne davantage ?* »

Pensées, Partie I, Art. II (p. 63)

<http://dai.ly/ILWCmK>

Document 2 : naissance du système métrique

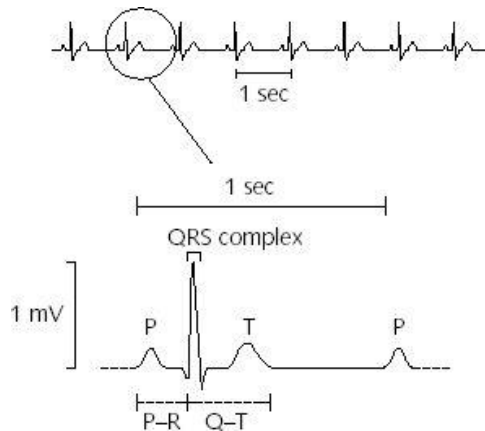
[...] pour parvenir à établir l'uniformité des poids et mesures, il est nécessaire de fixer une unité de mesure naturelle et invariable et que le seul moyen d'étendre cette uniformité aux nations étrangères et de les engager à convenir d'un système de mesure est de choisir une unité qui ne renferme rien d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe...

Assemblée Constituante, par un décret datant du 26 mars 1791
(reprenant des extraits de cahiers de doléances)

Document 3 : sur l'électrocardiogramme

« Un cœur n'est juste que s'il bat au rythme des autres cœurs. »

Paul Eluard, *Poèmes retrouvés* (1945-1953)



source : <http://www.answers.com/topic/electrocardiogram>

Document 4 : temps et numération

Imaginons que deux personnes souhaitent se donner un rendez-vous. Comment faire pour être sûr qu'elles seront bien présentes au même moment, au même endroit ?

Pour mesurer le temps, il faut avoir le nez en l'air et regarder les étoiles. Notre étoile, le Soleil, est la première source de mesure du temps. L'alternance de lumière jour-nuit nous donne une première balise : un jour, c'est la durée séparant deux positions identiques du Soleil. Pour se donner un rendez-vous, on peut par exemple se dire : « rendez-vous dans 3 jours, ici », c'est-à-dire : « on attend que le soleil passe 2 fois à cette position du ciel et on se retrouve à la troisième ».

Mais comme cette durée est un peu longue, on a eu l'idée de la subdiviser en plusieurs parties. En l'occurrence, on a choisi 24 subdivisions. Pourquoi 24 ? Il faut remonter au temps des Babyloniens pour avoir la réponse. **Ceux-ci comptaient sur leur doigts comme nous mais en comptant aussi les 2 pouces des pieds ! Ils comptaient donc jusqu'à 12.** C'est surprenant pour nous, mais pas si idiot quand on y pense. 12 se divise par 2, 3, 4 et 6, ce qui est très commode pour faire des calculs quand on n'a pas de calculatrice. Ainsi, si l'on veut diviser la journée en parties égales et que l'on compte en base 12 comme les Babyloniens, on obtient 12 heures le jour et 12 heures la nuit, ce qui nous donne 24 heures pour une journée complète.

Dans la foulée, on peut aussi diviser l'année en 12 mois : un an, c'est la durée nécessaire pour que le Soleil revienne à la même position dans le ciel les jours de solstice. De plus, en un an, on observe 12 fois la pleine lune : encore un argument pour compter en base 12 et diviser l'année en 12 mois.

Au passage, si l'on compte le nombre de fois où le Soleil se lève en 1 an, on trouve 365. Si l'on n'est pas trop regardant, 365 c'est à peu près 360. Et alors ? Alors 360, c'est 12 fois 30, on retrouve encore un beau 12 et le nombre de jours à mettre dans un mois.

Pourquoi une seconde est-elle le 60ème de la minute qui elle-même est le 60ème de l'heure ? Il aurait été plus simple de prendre le 100ème dans les deux cas, les conversions en auraient été largement simplifiées.

Cette question résonne avec une autre question : pourquoi les angles sont mesurés en degré, minute, seconde ? Pour mesurer une durée plus précise que l'heure, il faut inventer des mécanismes du type gnomon : un bâton planté dans le sol. L'ombre portée par le bâton sur le sol nous donne un moyen simple de mesurer des durées précises. C'est le principe du cadran solaire où la mesure du temps est en fait une mesure d'angle.

Pour mesurer les angles, les Babyloniens (« fanas » du 12) ont eu l'idée de diviser le cercle en 6 parties égales (la moitié de 12), elles-mêmes divisibles en 60 parties égales (la moitié de 120), on obtient le 360 degré (6x60) du tour complet.

Une fois que l'on a le degré, il ne reste plus qu'à inventer sa subdivision : le 60ème de degré qu'on appelle minute et le 60ème de minute qu'on appelle la seconde.

Là encore, la faute en revient aux Babyloniens. Et nos 60 minutes par heure (ou degré) et 60 secondes par minute sont une réminiscence de la culture babylonienne.

Pour faire des tâches quotidiennes, ce système de mesure du temps est parfaitement adapté et on l'utilise tous les jours pour se donner des rendez-vous. Mais si l'on cherche un peu de précision, on remarque que ça ne fonctionne pas tout à fait : le soleil met moins de 24 heures pour revenir à une même position, et il y a un peu plus de 365 jours dans un an...

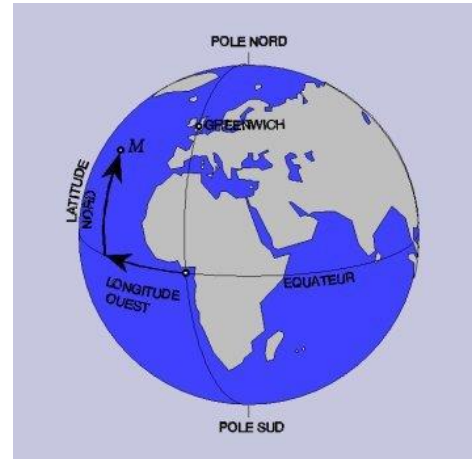
D'après <http://lewebpedagogique.com/physique/definition-de-la-seconde/>

Document 5 : course après le temps

Le **Longitude Act** est une loi du parlement britannique de 1714 offrant un prix de 20 000 livres (une somme considérable pour l'époque) à celui ou celle qui déterminerait une méthode simple et sûre pour permettre la détermination de la longitude d'un navire en pleine mer.

Si la mesure de la latitude a toujours été relativement facile grâce à la mesure de la hauteur de l'étoile polaire ou du soleil, la détermination de la longitude présente de réels problèmes pratiques en haute mer.

En 1707, l'amiral Cloudesley Shovell, naviguant par temps de brouillard au nord des îles Scilly, pensait qu'il naviguait en pleine mer. La flotte s'échoua et plus de 2 000 hommes moururent. Cet accident, conjugué à la volonté britannique de suprématie maritime, fut à l'origine du "prix de la longitude".



Pendant de longues décennies, plusieurs personnes ont tenté de remporter le prix. Il fut enfin gagné par John Harrison, un horloger. Alors que tous les efforts précédents pour déterminer la longitude s'orientaient vers la méthode des distances lunaires (position de la lune par rapport à des étoiles), Harrison s'efforça de construire une horloge de précision capable de garder l'heure du port d'origine. La connaissance précise de l'heure avec l'observation de la hauteur du soleil permet ainsi de déterminer la longitude. Avec l'aide du Bureau des Longitudes, il commença en 1730 à construire plusieurs chronomètres de marine et atteint finalement en 1761 la précision inférieure au demi degré nécessaire pour remporter le prix.

D'après http://fr.wikipedia.org/wiki/Longitude_Act

Document 6 : conférence internationale de Wahington (1884)

[...] October 1884. At the behest of the President of the United States of America 41 delegates from 25 nations met in Washington, DC, USA for the International Meridian Conference.

At the Conference the following important principles were established :

1. It was desirable to adopt a single world meridian to replace the numerous ones already in existence.
2. The Meridian passing through the principal Transit Instrument at the Observatory at Greenwich was to be the 'initial meridian'.
3. That all longitude would be calculated both east and west from this meridian up to 180°.
4. All countries would adopt a universal day.
5. The universal day would be a Mean Solar Day, beginning at the Mean Midnight at Greenwich and counted on a 24 hour clock.
6. That nautical and astronomical days everywhere would begin at mean midnight.
7. All technical studies to regulate and extend the application of the decimal system to the division of time and space would be supported.

Resolution 2, fixing the Meridian at Greenwich was passed 22-1 (San Domingo voted against), France & Brazil abstained.

<http://www.greenwichmeantime.com/info/conference.htm>

Document 7 : à la recherche du temps universel

Pendant des siècles, l'heure du Soleil fut la seule accessible grâce aux cadrans solaires. On définit ainsi le **temps solaire vrai** en un lieu comme l'angle horaire du Soleil en ce lieu pour un instant donné. C'est une notion hybride qui traduit à la fois le mouvement de la Terre autour de son axe et son mouvement de révolution autour du Soleil.

L'heure solaire présente cependant plusieurs inconvénients : tout d'abord elle est locale, c'est-à-dire qu'elle dépend du lieu où on se trouve. Ensuite, elle n'est pas uniforme du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre. Ce dernier inconvénient a été résolu en utilisant un **temps solaire moyen** résultant d'une moyenne sur une année dont on connaît l'écart au temps solaire vrai par *l'équation du temps*. Il reste encore le problème d'une heure qui dépend du lieu où on se trouve.

La question a été soulevée au travers des cahiers de doléances au siècle des Lumières. Ce problème a été résolu au XIX^{ème} siècle, notamment sous l'impulsion des compagnies de chemins de fer. On a trouvé préférable d'utiliser la même heure partout dans le pays : en France, l'heure de Paris définie par le **temps civil** de Paris – défini, lui, comme étant le temps solaire moyen de Paris augmenté de 12 heures (le temps solaire moyen fait commencer le jour à midi – c'est le seul instant *observable* – ce qui n'est pas pratique dans la vie de tous les jours...).

Cette méthode de temps unique pour un pays réglé sur le temps moyen de l'une des villes pose à nouveau le problème de coordonner une heure *dans le monde entier*, à une époque où les voyages internationaux s'apprentent à devenir courants. S'il est possible d'imposer l'heure de Paris dans toute la France (l'écart au temps solaire vrai ne dépasse pas 30 minutes environ, à Brest ou à Strasbourg), il sera plus difficile de l'imposer au reste du monde du fait du décalage au temps solaire vrai qui ira grandissant en s'éloignant du lieu de référence. Cela a amené les états à se mettre d'accord pour définir un **temps universel (UT)**, référence pour tous, et des temps locaux qui ne différeraient que d'un nombre entier d'heures, par la création de fuseaux horaires.

Le temps universel est donc une échelle de temps universelle, comme son nom l'indique. Par convention internationale, le temps universel est le temps solaire moyen de Greenwich, augmenté de 12 heures. Il existe plusieurs variantes de UT : UT1, par exemple, tient compte de la non-uniformité de la rotation terrestre et de ses conséquences à la longitude où on l'utilise (contrairement à UT0).

D'après <http://www.imcce.fr/en/grandpublic/systeme/promenade/pages5/502.html>

Document 8 : l'équation du temps

Dans le système de temps universel (UT) instauré dès 1925, la seconde est définie comme la 86 400^{ème} partie du jour solaire moyen. Par convention, l'*équation du temps*, à un instant donné, est la différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai.

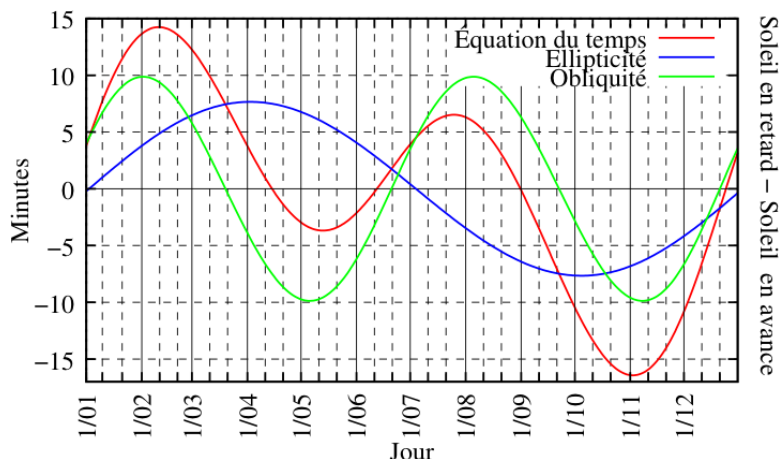
- Le temps solaire *moyen* est basé sur le soleil moyen, défini comme un objet qui, tout au long de l'année, se déplacerait sur l'équateur à une vitesse constante, telle que la durée du jour solaire moyen soit de 24 heures exactement [soit 86 400 secondes].
- Le temps solaire ou temps *vrai* est une mesure du temps basée sur le soleil vrai, tel que donné par un cadran solaire. En particulier, le midi solaire correspond à l'instant de la journée où le Soleil atteint son point le plus élevé dans le ciel ; il dépend de la localisation géographique du lieu où on le mesure.

L'évolution de l'*équation du temps* sur une année complète est représentée par la courbe rouge sur la figure ci-dessous.

En première approximation, sa forme s'analyse comme résultant de la superposition de deux sinusoïdes :

- en bleu sur le diagramme : *une sinusoïde de période égale à un an*, d'amplitude égale à 7,66 minutes et s'annulant aux passages de la Terre aux apsides : périhélie le 3 janvier et apogée début juillet. Cette composante reflète l'excentricité de l'orbite terrestre ;
- en vert sur le diagramme, *une sinusoïde de période égale à une demi-année*, d'amplitude 9,87 minutes et s'annulant aux solstices et aux équinoxes. Cette composante résulte de l'obliquité de l'écliptique sur l'équateur.

L'équation du temps, en rouge, s'annule quatre fois par an, vers le 15 avril, le 13 juin, le 1^{er} septembre et le 25 décembre. Son maximum, atteint vers le 11 février, vaut 14 min 15 s, et son minimum, atteint vers le 3 novembre, vaut - 16 min 25 s.



D'après <http://www.obs-besancon.fr/tf/equipes/vernotte/echelles/node3.html>

Document 9 : naissance et mort du temps des éphémérides

En 1937, se basant sur la variation saisonnière de la marche de plusieurs horloges, et exploitant la stabilité en fréquence des étalons à quartz (apparus dans les années 1920) nouvellement entrés dans les services horaires des laboratoires, l'astronome Nicolas Stoyko de l'Observatoire de Paris établit que la Terre tourne plus rapidement de juillet à octobre puis plus lentement le reste de l'année. L'explication tardera à venir : l'éloignement de la Lune est directement lié aux marées et au ralentissement de la Terre ; le jour sidéral varie et le mois lunaire aussi. Le mouvement de l'axe des pôles, de mieux en mieux connu¹ (oscillations libres de Chandler, oscillations saisonnières dues aux masses d'air et d'eau, dérives dues aux déformations lentes de la croûte), joue lui aussi un rôle important.

Le ralentissement séculaire due à la perte d'énergie cinétique par effet de marées implique que le jour diminue de 1,64 ms/ siècle actuellement : le calcul théorique donne un retard cumulé de 5 heures sur 2 000 ans – retard que l'on vérifie sur les lieux où se sont produites les éclipses de Soleil décrites par les historiens de l'Antiquité ; il y a 220 millions d'années, la Terre tournait sur elle-même en 23 heures.

Les mouvements de l'atmosphère, ou encore le couplage noyau-manteau terrestres rendent alors délicate la construction d'une échelle de temps fondée sur la mécanique terrestre : la dernière en date, celle du temps des éphémérides (TE) en 1956, sera complexe à mettre en œuvre – la naissance des horloges atomiques lui donnant rapidement le coup de grâce...

Document 10 : le temps d'aujourd'hui

La seconde est aujourd'hui l'unité du Système international (SI) connue avec la plus grande précision : on dispose aujourd'hui d'une exactitude allant jusqu'à la 16^e décimale (10^{-16}). L'exactitude et la stabilité de l'échelle dite du Temps Atomique International (TAI) obtenue à partir de plus de 200 horloges atomiques au césium sont environ dix millions de fois supérieures à celles du temps des éphémérides. C'est d'ailleurs l'unité du SI la plus précisément connue.

La première horloge atomique à jet de césium est apparue en 1955 : elle a conduit à l'abandon d'une définition mécanique de la seconde (basée sur l'année) au profit d'une définition atomique (durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133) adoptée lors de la Conférence Générale des Poids et Mesures de 1967.

Le 1^{er} janvier 1972, un temps universel standard a été instauré pour servir de base à l'heure légale dans le monde. C'est l'Universal Time Coordinated (temps universel coordonné UTC.) Depuis 1978, c'est le temps légal en France. Son origine a été définie par convention de telle sorte que UT1 – TAI soit égal à zéro le 1^{er} janvier 1958.

Il ne faut voir dans UTC qu'une variante de UT1 à laquelle elle est intimement liée. C'est un compromis entre TAI et UT1 puisque, même si son unité de temps est la seconde TAI, elle ne peut s'éloigner de UT1 de plus ou moins de 0,9 seconde.

Comment maintenir cet écart maximum ? Le *Service International de la Rotation de la Terre* (International Earth Rotation Service, IERS – anciennement Bureau International de l'Heure, BIH) à Paris surveille cet écart et intercale ou retranche une seconde à l'UTC. Cette correction se fait soit le 30 juin, soit le 31 décembre à minuit. La minute compte donc 61 secondes et nos montres... avancent d'une seconde. Il ne nous reste plus qu'à les remettre à l'heure.

Le 1^{er} janvier 1972, la différence TAI – UTC était de 10 secondes. Depuis, 23 secondes ont été rajoutées et la différence TAI – UTC est actuellement de 34 secondes et passera à 35 secondes en juin 2012.

Même si UT1 présente des irrégularités, c'est quand même bien la rotation de la Terre qui rythme nos jours et nos nuits : il serait dommage, sous prétexte d'avoir une seconde stable, de voir le Soleil au zénith... à 15 h 00 par exemple !

Les satellites de géolocalisation embarquent de telles horloges atomiques, extrêmement précises. Toutefois, le temps du GPS n'est pas un temps au sens légal, bien que cela soit un excellent temps puisque construit sur le temps TAI. En effet, bien qu'il soit corrigé de tous les effets relativistes, il reste à le corriger correctement des variations d'indice de la troposphère, ce qui est mal connu. Le projet Galileo qui émettra sur deux fréquences amoindrira un peu cette difficulté, mais qui existera toujours. D'autre part, les transferts de temps ne peuvent se faire à mieux que 100, voire 10 ps, d'où la nécessité d'améliorer l'électronique de base, mais à un niveau de 10 ps, c'est très difficile. La plupart des composants comme les connecteurs ne sont pas prévus pour cela.

En définitive, le temps UTC est basé sur le temps TAI, recalé pour l'instant sur UT par des secondes intercalaires : il est d'exactitude inférieure à 50 ns, et de précision inférieure à 10^{-15} .

Une version spatiale d'une horloge à atomes refroidis (PHARAO) devrait prochainement être embarquée à bord de la Station Spatiale Internationale afin de permettre des transferts de temps avec une précision de l'ordre d'une dizaine de picosecondes (projet ACES, Atomic Clock Ensemble in Space)... Il est probable que dans les années à venir, vu les progrès réalisés sur les horloges optiques à ions piégés (précision attendue 10^{-18} ou 10^{-19}), le Système international optera pour un changement de l'unité de temps, en continuité avec la définition actuelle.

¹ http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/earthor/polmot/pm_fr.html

Document 11 : évolution des étalons de temps

