

→ Aperçu

edp sciences

# LE TEMPS EN IMAGES



CRAIG CALLENDER & RALPH EDNEY

→ **Apërçu**

# **LE TEMPS**

**CRAIG CALLENDER ET RALPH EDNEY**

**edp sciences**

## Avertissement

La version en français que nous proposons ici est une adaptation qui conjugue le style simple en anglais, parfois simpliste dans ses affirmations, de l'auteur – avant tout un philosophe de formation – et la rigueur factuelle que doit respecter une maison d'édition scientifique française, surtout pour une série qui se veut accessible à un large lectorat en France et dans le monde francophone.

Aussi avons-nous pris le parti d'ajouter quelques notes d'explication a minima, faute de quoi les lecteurs allaient, nous semble-t-il, rester sur leur faim.

Nous avons ajouté, par exemple, des références bibliographiques de textes d'auteurs français qui traitent de la question du temps, quelques renvois aux textes d'origine en anglais cités et/ou consultés par le professeur Callender, y compris de courts extraits pour satisfaire le lecteur bilingue.

Enfin, nous nous sommes permis – là où cela s'imposait pour des raisons d'exactitude factuelle – quelques corrections, non seulement aux chiffres avancés dans certains passages un peu complexes, mais aussi pour signaler de petites erreurs manifestes de compréhension (par exemple sur le ruban de Möbius ou sur le train d'Einstein) justifiant cependant ces rares substitutions dans les notes de fin.

### Dans la même collection :

*La théorie quantique*, J.P. McEvoy, O. Zarate  
*La physique des particules*, T. Whyntie, O. Pugh  
*La psychologie*, N. Benson

Édition originale : Time, © Icon Books Lts, London, 2001.

Traduction : Alan Rodney

Imprimé en France par Présence Graphique, 37260 Monts

Mise en page de l'édition française : studiowakeup.com

**ISBN : 978-2-7598-1228-8**

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2014

## Qu'est-ce que le temps ?

Le grand théologien et philosophe Augustin d'Hippone ou **saint Augustin** (en latin: Aurelius Augustinus), né en Algérie (354–430), dans son ouvrage *Les Confessions*, a décrit à quel point le concept du temps le perturbait.

Après avoir énuméré tout ce qu'il pouvait dire à ce sujet, sans savoir quelle en était la réalité – par exemple, que cela prend *du temps* rien que pour dire cette phrase –, il avoue être véritablement dans une «*situation pitoyable, car je ne sais même pas ce que j'ignore!*»<sup>1</sup>



Saint Augustin n'était pas le seul à être perplexe. La question de la nature du temps et d'autres problématiques associées – telles que savoir si le passé et le futur sont réels, s'il est possible de voyager dans le temps, ou expliquer le sens de la «*flèche*» du temps – figurent parmi les questions les plus fascinantes et incontournables qui n'aient jamais existé.

## Toutes sortes d'horloges

Dans la vie de tous les jours, nous connaissons bien deux sources qui rendent familier le concept du temps : les horloges qui nous entourent et notre sens (ou vécu) du temps qui passe.

On voit des horloges partout. Les pendules de nos aïeux, les réveils et même des horloges qui annoncent le temps en diffusant des parfums variés.

*Il y a aussi les horloges naturelles.*



Les horloges existaient bien avant que ne furent inventés les modèles portables que l'Homme a assemblés.

Il y a 4 000 ans, les Égyptiens dressaient des obélisques et lisaient les heures (et les saisons) par la position (et par la longueur) de l'ombre portée sur le sable, mais aussi au moyen de cadrans solaires et de clepsydres, mis en mouvement par le remplissage et le vidage réguliers d'une vasque où flottait un personnage qui marquait le temps de son bras, et d'un « pointeur ».

Les anciens Babyloniens, environ 1800 avant notre ère, savaient diviser<sup>2</sup> la journée en heures, chaque heure en 60 minutes et chaque minute en 60 secondes<sup>3</sup>.

*Toutes les grandes civilisations du passé ont utilisé les positions du Soleil ou des étoiles pour « lire l'heure ».*

*Ces horloges naturelles étaient très précises.*

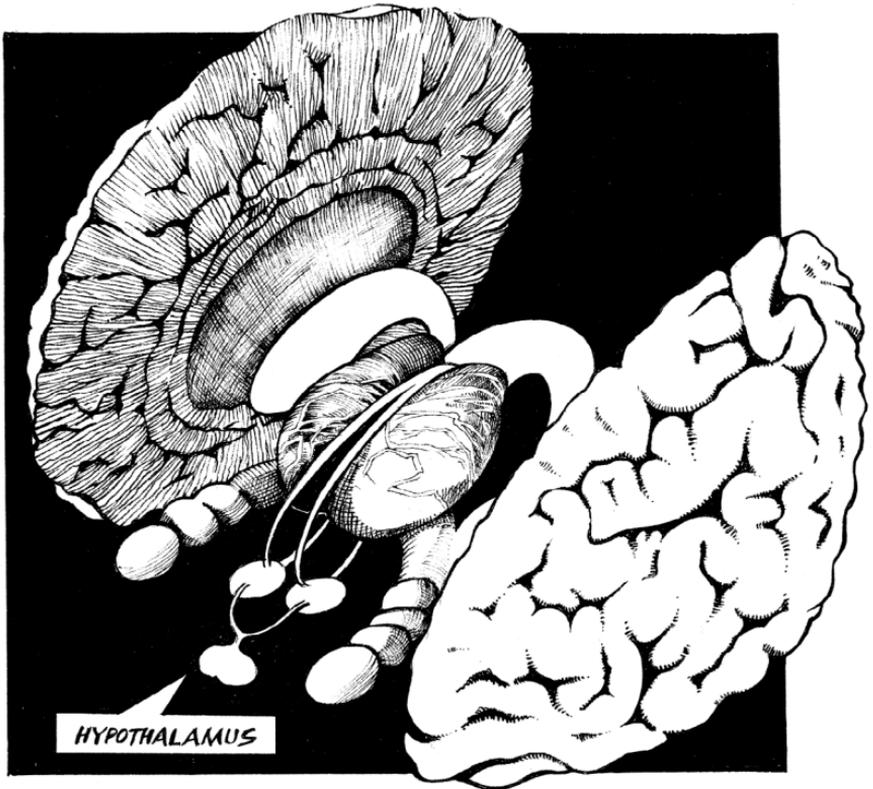


En observant les étoiles<sup>4</sup> à l'œil nu, un astronome de l'Antiquité pouvait « lire l'heure » avec une précision d'environ 15 minutes. De nos jours, n'importe qui peut savoir à peu près l'heure qu'il est en localisant rapidement le Soleil dans le ciel.

## Les horloges biologiques

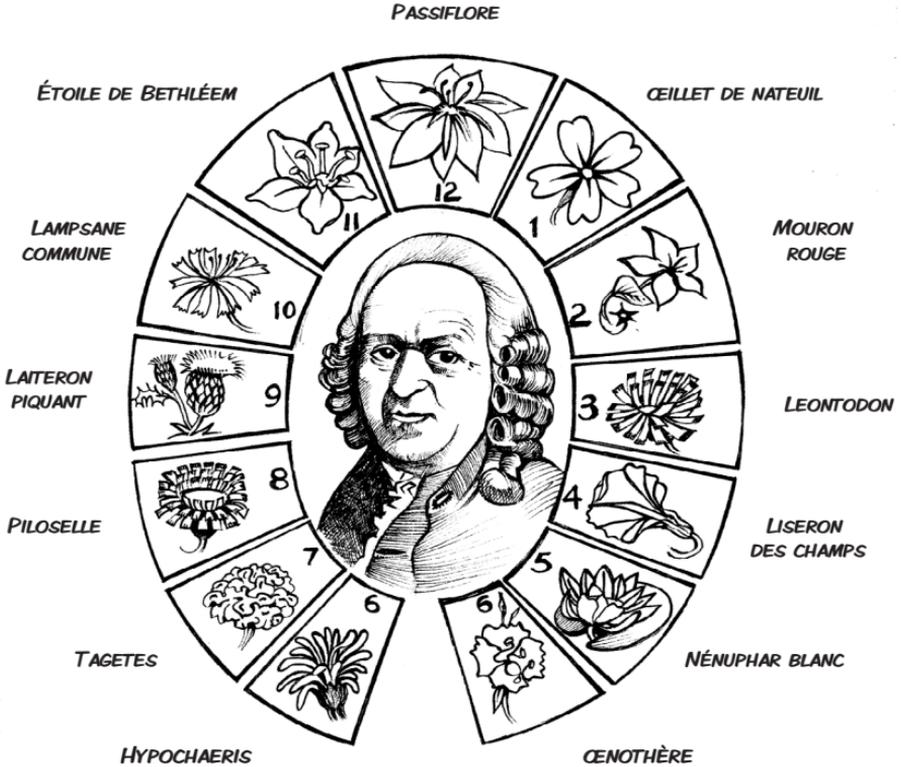
Nous portons en nous nos propres horloges, dites biologiques. Notre cœur pulse le sang dans notre corps à environ 70 battements par minute. Nos humeurs, notre capacité à nous concentrer et notre appétit suivent des fluctuations et schémas très réguliers, selon l'heure du jour, le cycle de la Lune ou des saisons.

*Notre horloge biologique semble être intimement liée à un bloc de cellules nerveuses localisées dans notre hypothalamus<sup>5</sup>.*



Ces cellules sont reliées à la rétine des yeux et permettent de réguler nos sécrétions d'hormones, la température de notre peau et nos cycles de sommeil et d'éveil. La mélatonine, une hormone, joue un rôle déterminant dans le contrôle de notre rythme journalier (dit circadien).

Nous n'avons pas l'exclusivité des horloges biologiques. Chaque organisme vivant semble en porter une. Certaines sont si précises que **Carl von Linné**, un naturaliste suédois de renom (1707-1778), avait même proposé une référence aux fleurs comme horloges naturelles<sup>6</sup>.



Ce qui surprend, c'est que les horloges biologiques ne sont pas toutes calées sur le jour, le cycle lunaire, les saisons ou même sur l'année. Un exemple est la cigale ou **Cicadidae**, que l'on connaît bien pour son «chant» l'été, qui vit d'abord 17 ans sous terre. Après ce très long enfouissement, les cigales émergent par milliers, toutes en même temps, grimpent dans les arbres, se reproduisent, puis meurent quelques heures plus tard. Les œufs sont pondus sous terre autour du tronc d'arbre et le cycle de 17 ans recommence.

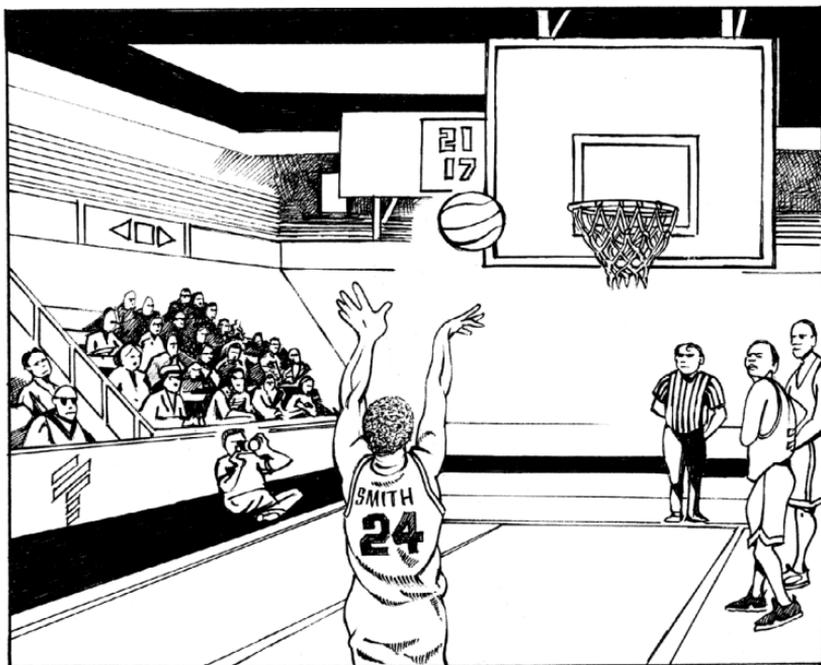
Qu'elles soient naturelles ou fabriquées par l'Homme, les horloges ont toujours aidé à ordonner les cycles de vie des Hommes. De nos jours, l'horloge contemporaine peut être source de stress, de beaucoup de stress!

## Le temps psychologique, ressenti

Il nous arrive de sentir passer le temps. En plus du temps mesuré au moyen d'horloges, montres, etc., il existe un temps psychologique. Nous avons tous des souvenirs du passé et des projections vers l'avenir. Nous « ressentons » des durées temporelles de longueurs différentes. Chacun de nous est subjectivement conscient du temps qui s'écoule.

*Tout le monde arrive à deviner approximativement le temps qui s'écoule entre deux événements.*

*Certains y excellent, comme s'ils avaient de vraies horloges internes, reliées on ne sait comment à leurs horloges biologiques.*



Ce qu'il est intéressant de noter – s'agissant de ces horloges internes – est qu'elles semblent s'accélérer ou ralentir, selon que l'on soit d'accord ou non avec l'horloge interne d'autres personnes.

En prenant sa montre comme référence, un tour de manège (de type « grand huit ») peut durer seulement 11 secondes.

Ces 11 secondes vont paraître une éternité pour le passager à bord du wagonnet et rien du tout, ou presque, pour une personne dans la file d'attente du manège. Un match de basket peut sembler aller très, très vite pour l'enfant qui joue dans l'équipe et, en revanche, traîner en longueur pour les parents qui en sont à leur 20<sup>e</sup> rencontre du mois !



Pour démarrer notre enquête et notre analyse du temps, il est important que nous nous rendions compte que le temps représente plus que de simples horloges ou même que notre vécu psychologique du temps qui passe. Le temps n'est pas seulement le réveil qui sonne sur le chevet ou quelque chose de notre esprit. Une fois cette prise de conscience réalisée, nous pouvons immédiatement aborder quelques questions à la fois étranges et profondes.

## Le temps, simple vue de l'esprit?

Après avoir apaisé son angoisse initiale, saint Augustin a avancé que le temps n'a pas vraiment d'existence en dehors de notre tête et de notre esprit.



*Avicenne (980–1037), philosophe perse, est d'accord avec saint Augustin.*

*Henri Bergson (1859–1941), philosophe français, a également défendu cette thèse.*

Est-ce que cela peut être vrai ? Si les gens peuvent ne pas être d'accord sur la durée du temps, d'un événement..., ils le sont généralement sur l'ordre séquentiel des événements.

Par exemple, un père et son fils revenant d'un match de basket peuvent ne pas avoir vu une seule horloge depuis leur départ pour aller assister au match – le ciel était peut-être bien couvert, de sorte qu'ils n'avaient aucune idée de la position du Soleil.



Supposons à présent qu'ils devinent l'heure, avant de voir une horloge. Ils peuvent avoir un écart de plusieurs heures l'un par rapport à l'autre ! Ils peuvent même se disputer à propos de qui a raison et qui a tort, mais en général ils s'accorderont sur l'ordre de certains faits et gestes du match.

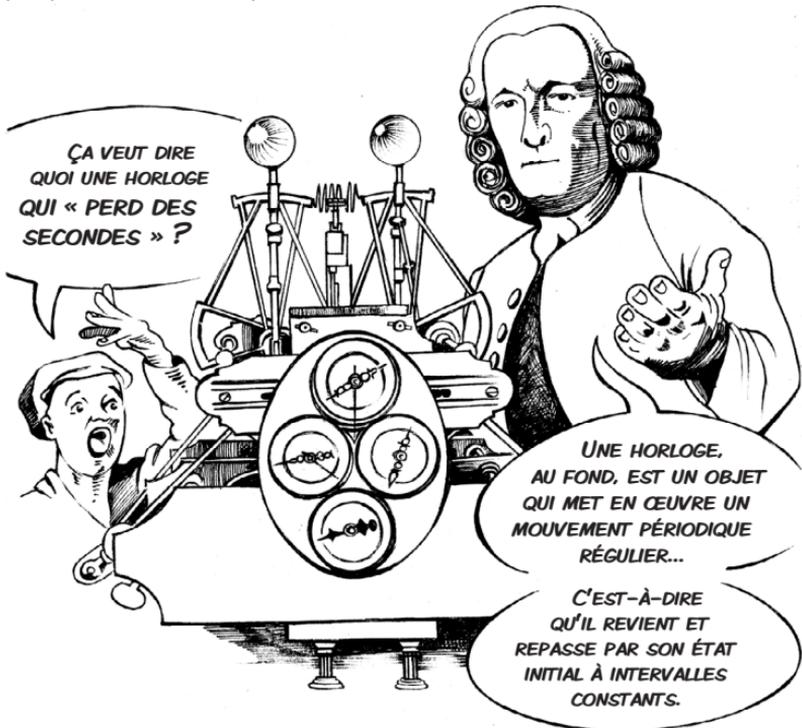
**« Nous sommes d'accord que les lancers francs de Smith en 2<sup>de</sup> mi-temps ont eu lieu après ses lancers francs de la 1<sup>re</sup> mi-temps. »**

**« Et Joey a eu un doigt cassé quand Smith lui a marché dessus. »**

Sauf dans de rares circonstances, tous ceux qui disposent de la même information sont d'accord sur l'ordre séquentiel des événements. Il y a ici quelque chose d'objectif et d'indépendant par rapport à l'esprit et aux sentiments relatifs à la séquence en question. L'objectivité quant à l'ordre d'événements démontre qu'il y a autre chose dans le concept du temps que notre seule sensation de son écoulement. Le fait est que les événements semblent être ordonnés dans une succession temporelle unique, indépendante de l'observateur.

## Les horloges et le temps

Cet accord sur l'écoulement du temps s'applique-t-il seulement à ce que nous « dit » une horloge ? Peut-être le concept du temps se résume-t-il à l'existence d'horloges ? Cela constitue en soi une question profonde. Mais, du moins au premier abord, la réponse paraît être « non », car souvent nous entendrons dire qu'une horloge n'est pas à l'heure. Vous pouvez me dire que ma montre accuse 10 minutes de retard ou qu'elle est carrément arrêtée. Pour vous, ce sera peut-être une bonne excuse pour être en retard à un rendez-vous. Mais votre montre est-elle infallible ? Même si c'est un modèle de grande qualité, nous savons qu'elle « perdra » ou « gagnera » quelques secondes chaque année.



Entre chaque tic-tac de l'horloge, nous voulons voir s'écouler exactement la même durée. Il n'est pas étonnant alors que les pendules – qui ont un mouvement périodique régulier, par quartz ou balancier – servent d'horloges. Mais le pendule n'est pas parfait – sur un navire en haute mer, son oscillation peut être perturbée, de même le mouvement peut être différent selon la température ambiante.

Prenons un pendule qui oscille. Comment savons-nous que le temps qu'il met pour effectuer un aller-retour est le même lors de sa seconde oscillation ? Ici, nous sommes face à un genre de questions qui illustre bien ce que le philosophe allemand **Hans Reichenbach** (1891–1953) a appelé « le problème de l'uniformité du temps ».



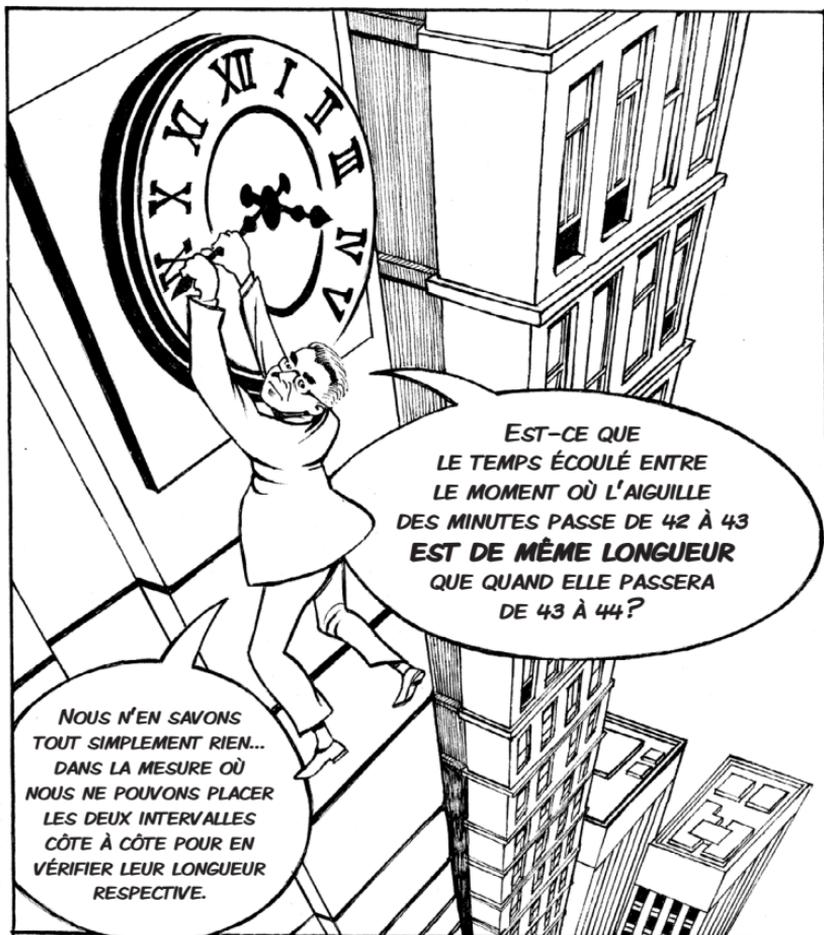
*Primo*, votre estimation personnelle du temps n'est pas scientifiquement assez précise. Nous avons besoin de vérifier que le temps du 1<sup>er</sup> aller-retour est exactement identique à celui du second.

*Secundo*, votre sensation vis-à-vis de la durée est purement subjective. Vous pouvez affirmer que les durées sont identiques et un ami pourra affirmer le contraire.

Et *tertio*, le plus important, vous avez « mesuré » l'écoulement du temps avec la pensée. Mais à y réfléchir, la pensée peut elle-même être soumise à des, ou être le résultat de, processus physiques... Dans ce cas, nous avons ajouté une question à la question, c'est-à-dire que maintenant nous nous demandons quelle peut être la durée d'une pensée.

## Comment mesure-t-on un intervalle de temps?

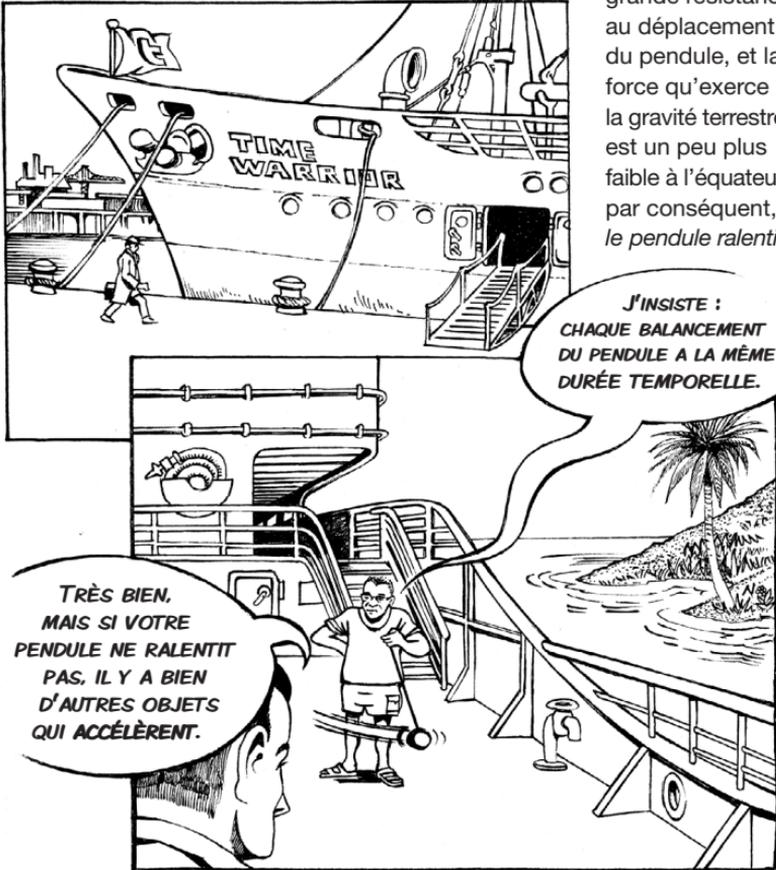
Nous ne savons pas mesurer directement un intervalle de temps. En fait, nous ne mesurons jamais le temps absolu. Cette minute-ci est-elle de la même durée que celle qui suivra? En un sens, bien sûr, la réponse est «oui», les minutes étant définies avec toujours la même durée. Mais notre propos se veut plus profond.



Revenons un instant aux mouvements du pendule. En dépit de notre incapacité à mesurer directement une durée, nous pouvons imaginer qu'un pendule est défectueux. Pourquoi? Eh bien, prenons un trublion qui insiste sur le fait que son pendule est infallible. Aurait-il tort d'affirmer cela?

Supposons qu'il décide d'emmener son pendule par bateau jusque l'équateur. Même si nous faisons la part des mouvements perturbateurs de la coque du navire, nous pouvons nous attendre à ce qu'au moins deux autres facteurs affectent la régularité du pendule : l'atmosphère à l'équateur plus humide offre une plus

grande résistance au déplacement du pendule, et la force qu'exerce la gravité terrestre est un peu plus faible à l'équateur ; par conséquent, le pendule ralentira.

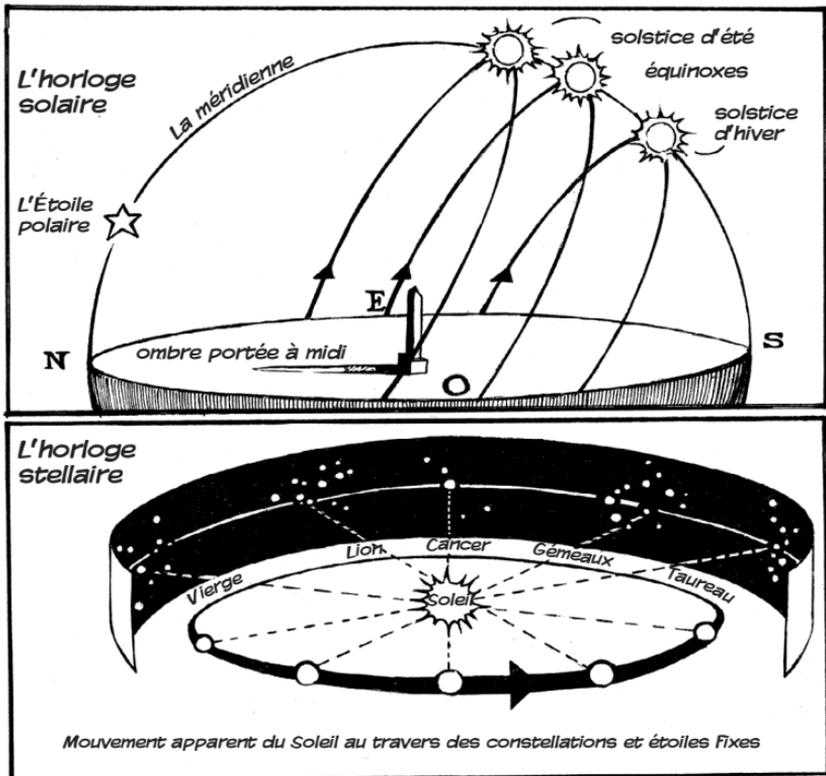


Le trublion va devoir prétendre que le bateau avance plus vite qu'avant, même si le vent soufflant sur les voiles reste constant, *idem* pour la force des courants marins, etc. De plus, il va devoir expliquer pourquoi toutes les horloges du monde ont commencé à accélérer, comme par magie, et pourquoi le Soleil a gagné en vitesse. Et puisqu'il ne pourra avancer d'explication pour ces changements, mais nous « si », il semblera juste de conclure que nous avons raison et lui tort. Notre hypothèse, que l'écoulement du temps peut être déterminé par le « mouvement » relatif des étoiles dans le ciel, est une affirmation plus scientifique que son hypothèse sur le mouvement imperturbable de son pendule.

## Les horloges les plus fiables

Notons au passage que trois horloges se sont montrées très précises. Depuis les débuts de l'Humanité, le Soleil et la voûte étoilée la nuit ont joué un rôle très important.

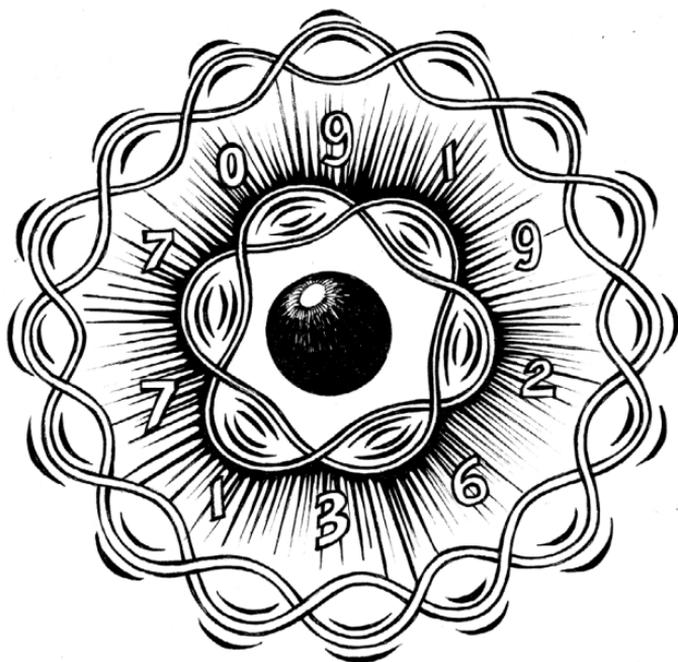
Le Soleil « définit » les tic-tac réguliers d'une horloge, et ce chaque fois que le Soleil « traverse » la méridienne. La nuit, les étoiles aussi, chaque fois qu'une étoile donnée est observée « plein sud ». Ces deux horloges-là sont plus précises que mon bracelet-montre.



Je peux invoquer l'usure des piles de ma montre pour expliquer des différences avec l'heure donnée par le Soleil ou par les étoiles, mais je ne saurais imputer les différences sur une supposée accélération ou un ralentissement du Soleil ou des étoiles. Bien que ces deux « horloges » soient étonnamment précises (la nuit étoilée encore plus que le Soleil), il existe des horloges bien meilleures.

## L'horloge atomique

Le développement de la physique des particules au cours du XX<sup>e</sup> siècle, en particulier les idées avancées par le physicien américain Isidor Rabi (1898–1988), ont contribué au concept de l'horloge atomique, assemblée en 1949. Chaque atome possède ce que l'on appelle une fréquence de résonance naturelle et c'est cette oscillation extrêmement régulière qui sert à définir les tic-tac de l'horloge. Ainsi, les horloges atomiques se sont révélées plus régulières, plus constantes qu'une horloge solaire ou astronomique. En 1999, le National Institute of Standards and Technology (NIST), à Boulder dans le Colorado, a commencé à utiliser une horloge atomique baptisée NIST-F1 pour définir l'unité qu'est la seconde<sup>7</sup>.

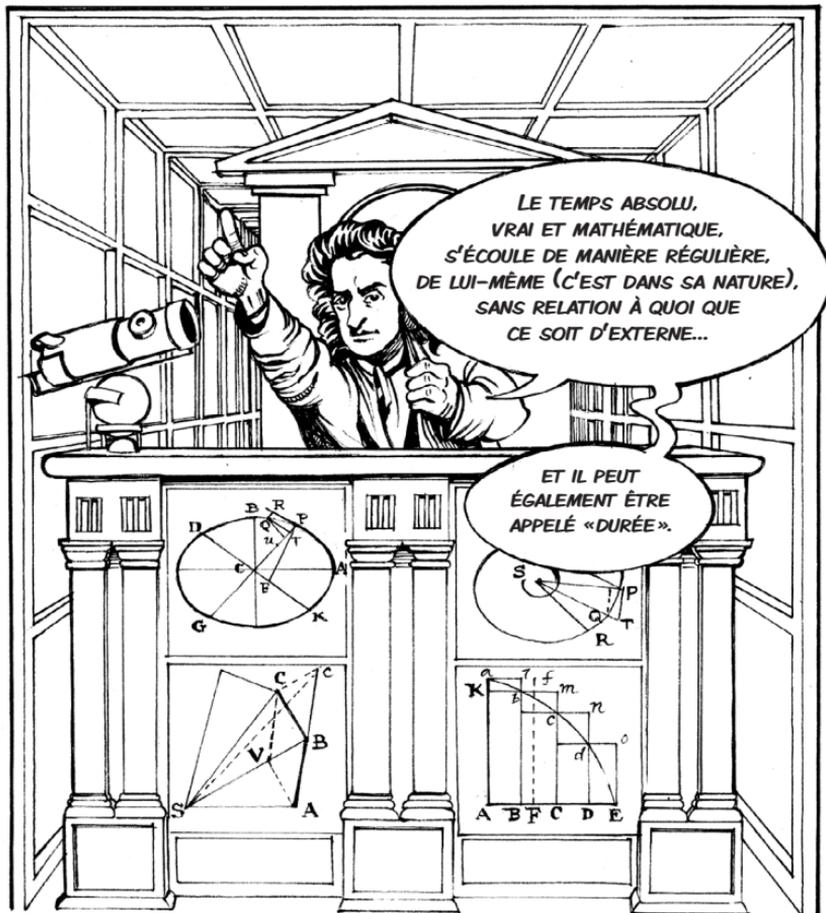


La seconde est définie scientifiquement comme la durée d'un peu plus de 9 milliards de vibrations d'un atome de césium. L'horloge NIST-F1 (ainsi qu'un autre modèle à l'Observatoire de Paris) est l'horloge la plus précise qui existe aujourd'hui. Avec un réseau d'autres horloges atomiques de par le monde, elle sert à fixer ce que l'on appelle le Temps Universel (TU), lequel, à son tour, sert à préciser la vitesse de la lumière, la longueur du mètre-étalon et ainsi de suite. Mais même cette horloge incroyablement précise va « perdre » une seconde entière tous les 20 millions d'années. Rien n'est parfait ici-bas !

## Le temps absolu, vrai et mathématique

Si l'horloge NIST-F1 est la meilleure horloge physique que nous connaissons dans le monde, comment les scientifiques arrivent-ils à estimer qu'elle va perdre ne serait-ce qu'une seconde tous les 20 millions d'années ?

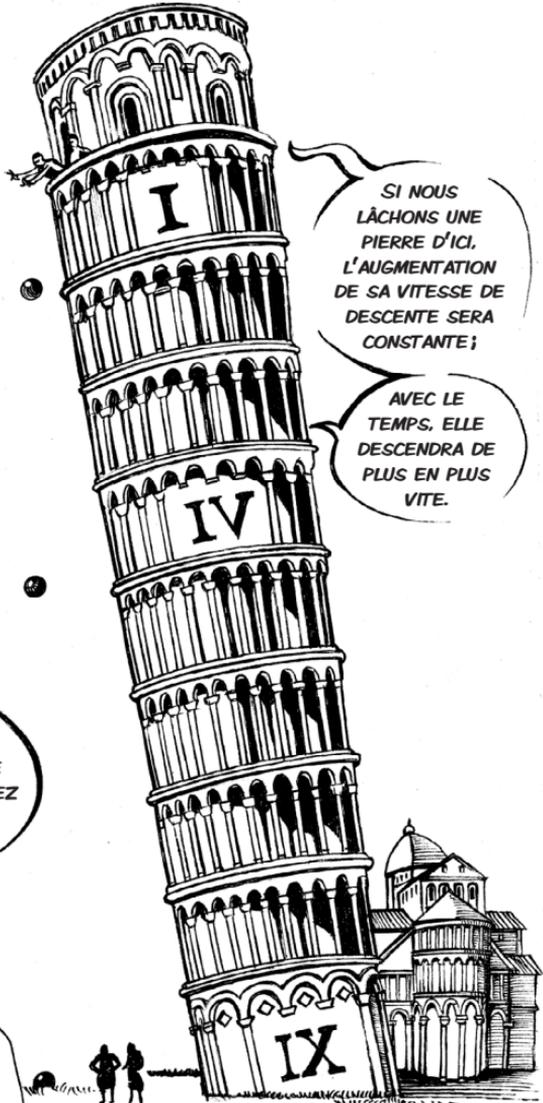
La réponse se trouve dans les lois de physique. C'est un point fondamental, clarifié on ne peut mieux par **Sir Isaac Newton** (1642–1727) – père de la mécanique classique et peut-être le plus grand physicien de tous les temps. Le temps, disait-il, ne doit pas être confondu avec sa « *mesure intelligente* ». Par cette expression, Newton voulait désigner les vraies horloges que nous consultons quotidiennement.



Le temps vrai, selon Newton, ne dépend d'aucune horloge en particulier, ni même de quelque objet matériel dans l'Univers. Le temps est ainsi indépendant du contenu de l'Univers.

C'est ce concept du temps que l'on trouve dans les lois immuables de la physique, celles qui nous indiquent *où* les choses se trouvent et *quand* elles y seront (ou doivent être). Ce faisant, la Nature tient pour acquise une mesure particulière du temps.

Par exemple, la physique classique nous dit que l'accélération d'un objet en chute libre est constante.



le temps (on ne parle ici que du voyage vers le passé).

<sup>30</sup> **Robert Weingard** (mort en 1996) était philosophe des sciences et professeur à la grande université de Rutgers (New Jersey), avec ses 65 000 étudiants et 4 campus.

<sup>31</sup> Tricératops était végétarien et vécut au Crétacé.

<sup>32</sup> “- *All You Zombies* -” n'existe pas en français, malheureusement, mais la trame en anglais vaut le détour, sur [http://en.wikipedia.org/wiki/AllYou\\_Zombies](http://en.wikipedia.org/wiki/AllYou_Zombies). Le **titre avec ses guillemets** et tirets est une citation de la fin du récit, où le héros dit que sa vie est une citation. C'est une courte œuvre de science-fiction écrite en une seule journée le 11 juillet 1958 publiée en mars 1959 dans *Fantasy et Science Fiction*.

<sup>33</sup> [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Hafele-Keating\\_experiment](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Hafele-Keating_experiment) (en anglais). En octobre 1971, **Joseph C. Hafele**, physicien et **Richard E. Keating**, astronome, ont emmené quatre horloges atomiques (à césium) à bord d'avions commerciaux subsoniques pour leur faire faire deux tours du globe, un dans chaque sens (chaque voyage a duré environ 3 jours, soit 72 heures). Ils ont publié leurs résultats dans Science en **1972 (177, 166)**.

Ces résultats sont la confirmation empirique du paradoxe des horloges. À leur retour à Washington, on a noté un gain net de +0,15 microseconde par rapport à l'horloge de référence restée à terre et « immobile ». En fait, le gain (décalage) est indifférent au sens des vols.

<sup>34</sup> Il est à noter que les « lignes droites » tracées sur le ballon sont elles-mêmes cour-

bées. On doit parler alors de lignes orthodromiques, celles que suivent les avions de ligne en traversant le globe.

<sup>35</sup> **Kurt Gödel** est austro-américain. Son résultat le plus connu, le théorème d'incomplétude, affirme que n'importe quel système logique suffisamment puissant pour décrire l'arithmétique des entiers admet des propositions sur les nombres entiers ne pouvant être ni infirmées ni confirmées à partir des axiomes de la théorie.

<sup>36</sup> Cependant, les lignes d'expansion ont un sens, ce qui indique « un centre » comme point de départ; la meilleure image est celle de Lord Kelvin, du pudding anglais avec des raisins. Le pudding explose et les raisins suivent bien des lignes partant du centre du pudding tout en s'éloignant les uns des autres!

<sup>37</sup> [www.science-bbscom/161.../08b4f631-3f966950.htm](http://www.science-bbscom/161.../08b4f631-3f966950.htm). L'une des sources les plus étonnantes de données et d'idées sur l'énergie est la cosmologie en physique et astrophysique, précisément dans les univers **Taub-Nut**, **Misner** et **Gödel**. On peut citer, par exemple, la cosmologie **Gott-Li** sur les boucles de temps... De nombreux articles y ont été consacrés.

<sup>38</sup> Cf. [http://archive.org/stream/geometryrelativi00ruck/geometryrelativi00ruck\\_djvu.txt](http://archive.org/stream/geometryrelativi00ruck/geometryrelativi00ruck_djvu.txt). En 1942, Gödel et Einstein étaient des amis proches, faisant tous les jours à Princeton le même chemin vers leur bureau. On se rappelle qu'en 1949, Gödel avait démontré mathématiquement la non-existence du temps dans un univers régi par la relativité.

<sup>39</sup> **Frank Jennings Tipler**, né en 1947, est physicien mathématique et cosmolo-

giste, auteur de textes sur l'Omega Point, un mécanisme pour faire ressusciter les morts.

<sup>40</sup> **John Richard Gott III**, né en 1947, professeur d'astrophysique à Princeton. Il est spécialement renommé pour avoir développé et soutenu des théories cosmologiques basées sur la science-fiction.

<sup>41</sup> **Carl Edward Sagan** (1934–1996) scientifique et astronome, fondateur du programme SETI de recherche d'intelligence extraterrestre ; Cf. sa série de vulgarisation scientifique Cosmos.

<sup>42</sup> Cf. **Möbius** [www.maths-et-tiques.fr/index.php/detentes/le-ruban-de-moebius](http://www.maths-et-tiques.fr/index.php/detentes/le-ruban-de-moebius).

<sup>43</sup> Geroch's splitting theorem. D'après Wikipédia – dans la théorie des structures causales, Geroch démontre son théorème de «*splitting*» (division) qui caractérise un espace-temps globalement hyperbolique, quoique assez pointu en termes mathématiques.

<sup>44</sup> *Ice Capades*. Pendant près de 60 ans, ce «show» était très populaire, avec des patineurs amateurs passant professionnels. Le show a repris récemment avec succès.

<sup>45</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Roger\\_Penrose](http://fr.wikipedia.org/wiki/Roger_Penrose) Roger Penrose – Il enseigne les mathématiques au Birkbeck College de Londres où il élabore la théorie décrivant l'effondrement des étoiles sur elles-mêmes, entre 1964 et 1973, et où il rencontre le célèbre physicien Stephen Hawking. Ils travaillent alors à une théorie sur l'origine de l'Univers, Penrose y apportant sa contribution mathématique à la théorie de la relativité générale appliquée à la cosmologie et à l'étude des trous noirs.

En 1974, il publie un article où il présente

ses premiers pavages non périodiques : les pavages de Penrose (Pentaplexity, Bulletin of the Institute for Mathematics and its Applications, 10, p. 266–271, 1974). On lui doit quelques objets impossibles, tel le triangle de Penrose.

<sup>46</sup> **À rebrousse-temps**, roman de Philip K. Dick, publié en 1967 aux États-Unis sous le titre *Counter-Clock World*. On peut acquérir **À rebrousse-temps** d'après une traduction de Michel Deutsch dans la collection J'ai lu, n° 613, publication : 1968, p. 249. Résumé : «Le cours du temps s'est inversé. Cela résulte d'un phénomène physique vaguement expliqué : l'effet Hobart. Il est donc tout à fait logique que les morts reviennent à la vie et que les vivants retournent à la «matrice». Les cigarettes se reconstituent dans les cendriers et les vêtements sales du matin sont devenus propres le soir.

<sup>47</sup> Wikipédia – Le second principe de la thermodynamique introduit la **fonction d'état entropie S** usuellement assimilée à la notion de désordre qui ne peut que croître au cours d'une transformation réelle.

<sup>48</sup> Le mot *entropie* a été inventé par Clausius qui justifie son choix dans *Sur diverses formes des équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur (1865)* : «*Je préfère emprunter aux langues anciennes les noms des quantités scientifiques importantes, afin qu'ils puissent rester les mêmes dans toutes les langues vivantes ; je proposerai donc d'appeler la quantité S l'entropie du corps, d'après le mot grec η τροπη une transformation. .../... (Cité dans Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences de D. Lecourt, chez PUF, 1999.)*