Que fait-on quand on mesure un temps ?

1. On met notre confiance à un mouvement parce qu'on le croit périodique.
   Périodique ?
   Personne ne pourra dire *ce mouvement est périodique* avec certitude. Mais tout le monde peut dire *j'ai confiance en la périodicité de ce mouvement*.
   Car *mesurer un temps*, c'est comparer la durée d'un événement avec le nombre d'oscillations d'un mouvement choisi comme référence.
   Dans ce qui suit sera dit *à la louche* quels furent les mouvements qui ont été choisis comme référence par ces drôles de singes que sont les humains.

Les horloges célestes

2. Nous sommes tous soumis au rythme du jour et de la nuit depuis que l'humanité … a vu le jour.
   Hypothèse : nos lointains ancêtres *Homo Sapiens* ressentaient l'alternance du jour et de la nuit comme *régulière*.
   Mais nos lointains ancêtres ressentaient que la durée du jour étaient plus longue les étés et plus courte les hivers. Sauf bien entendu s'ils habitaient sur l'équateur.
   Voilà qui faisait désordre, sauf si on se référait au temps entre deux positions de hauteur maximale de l'astre du jour, le milieu du jour, le *mi di*, ce qu'on appelle le *jour solaire*.
3. Depuis quand les humains savent-ils compter ? Quand ont-ils commencé à écrire des nombres ? Personne ne le sait, sauf qu'une unanimité entre historiens et préhistoriens s'est faite pour nous dire "bien avant l'écriture".
4. Nos ancêtres prirent aussi conscience que le mouvement apparent du ciel étoilé nocturne est visiblement *aussi régulier* que l'alternance du jour et de la nuit. Par définition le temps entre deux positions successives de hauteur maximale d'une étoile choisie comme référence sera le *jour stellaire*.
5. Sauf que, partout, même sur l'équateur, un retard d'une fraction de jour entre les jours solaire et stellaire augmente, pendant un peu plus de 182 jours pour un total d'un demi-jour, puis encore pendant un peu plus de 182 autres jours pour un total, un demi plus un demi faisant un, d'un jour, si bien que tous les 365 jours et un quart le ciel se retrouve exactement le même au même instant … à quelques étoiles près qu'on appellera des planètes.
6. Le concept de l'année est né, d'autant plus que ce rythme de cette coïncidence correspond, disons à la louche tellement la météorologie est capricieuse, à celui des saisons.
   Les humains disposent donc dans le ciel de deux horloges distinctes en apparence aussi fiables l'une que l'autre.

Étoiles et planètes

7. Ces "quelques étoiles près" au comportement singulier sont appelées justement *planètes*. Elles semblent aller et venir un peu comme elles le veulent. Il a fallu certainement beaucoup de patience aux astronomes de ces temps reculés de l'aube de l'humanité pour en deviner les périodes.
   Mais assez tôt, pensent les historiens de l'astronomie, on a repéré que deux planètes ne s'éloignent jamais beaucoup du soleil contrairement aux autres. Voyons : un tour de cercle, c'est 360 degrés. Or l'angle défini par l'astronome, le soleil et la planète – appelons SOP – n'atteint jamais 180°, comme si elles suivaient le soleil dans sa course quotidienne comme un toutou suit son maître. On les appelle aujourd'hui *Mercure* et *Vénus*. L'angle SOP maximal de Mercure est nettement plus petit que celui de Vénus.
   Les autres planètes peuvent atteindre et dépasser l'opposition (l'astronome est alors sur le segment de droite joignant le soleil et la planète, ce qui donne un angle SOP égal à 180°). À l'œil nu sont visibles *Mars*, *Jupiter* et *Saturne*.

Découpes géométriques

8. Avec une branche ou une ficelle et un pieu, sur le sol sableux, on peut tracer des cercles, puis les diviser en six parties égales. On peut imaginer ce que cette observation a pu induire dans la tête de nos lointains ancêtres. Est-ce de la magie ? S'agit-il de la volonté d'une divinité ? Les cercles sont-ils des personnes avec leur goût de la symétrie ? Le nombre six a du prendre une place prépondérante dans les raisonnements, les hypothèses ou les pensées de nos lointains ancêtres. Puis le pieu et le fil permettent de diviser chaque sixième de cercle en deux secteurs égaux et chaque secteur encore en deux. Le cercle est divisible en six, douze ou vingt-quatre parties égales. Mais au-delà, il est clair que le tracé a du manquer de lisibilité et limiter la finesse du partage du cercle sur un support matériel. Mais l'imaginaire des *Homo sapiens*, lui n'a pas de limite et *en pensée* a du admettre que la finesse de la division peut se poursuivre indéfiniment, au moins pour un dieu, déesse ou autre personnage fabuleux.
9. Les mouvements dans le ciel sont en apparence circulaires. Si on les représente par des cercles, alors on imagine pouvoir en théorie diviser les mouvements célestes en 6, 12, 24 ou plus parties égales.
   Le fil et le pieu permettent aussi de matérialiser la ligne droite et la diviser en autant de parties de même longueur, ce qu'on apprend aujourd'hui à nos enfant sous l'expression *théorème de Thalès*, bien que les historiens des sciences admettent que ce ne fut certainement pas lui, ni même aucun autre géomètre grec qui l'ait inventé ni proposé pour la première fois une démonstration.

10. La date de l'invention de la roue est inconnue, peut-être définitivement. Tout ce qu'on peut dire, c'est l'âge de la plus ancienne roue découverte par un archéologue : entre 3340 et 3030 avant Jésus-Christ. Autant dire que la roue est au moins aussi ancienne que l'écriture.
Poser un fil sur le périmètre d'une roue, repérer la longueur du dit périmètre, l'étendre en un segment de droite et le découper par un traçage utilisant le théorème de Thalès, c'est facile. Le cercle est désormais divisible en autant de parties de longueurs égales qu'on veut.
11. À une condition : *faire confiance en la longueur du fil*, admettre qu'il ne s'étire ni se contracte pendant les opérations. C'est toute la question de la *référence*, la référence des longueurs comme la référence des temps, les références matérielles qu'on appelle des *étalons*.
12. Alors, une fois obtenue la division en heures du cercle, avec la ficelle et la le théorème de Thalès, on peut diviser l'heure en six, puis une sixième partie d'heure en dix parties égales nommées *minutes*, puis chaque minute en six fois dix parties égales dites *secondes*.
13. Les humains aiment parfois rythmer leurs journées, ne serait-ce que pour les repos et les repas. Mais découper le jour en temps égaux, ça, avec le ciel on ne savait pas le faire.

Digressions intellectuelles

14. Observer, compter, dresser des tables numériques, prendre conscience des rythmes de la nature, de la durée limitée des êtres vivants y compris les humains, les comparer avec ce qui se passe dans le ciel, ce qui nous donnera les *horoscopes*, celle des êtres, ce que les Romains appelaient *augures*, mot donnant ensuite en vieux français *oür*, *aür* ou *eür*, puis *heure*.
Et si ces mouvements permettaient de prédire le nombre de jours avant les saisons en regardant vers l'avenir ou se souvenir depuis quand eurent lieu les précédentes en regardant vers la passé ? Localiser les bons moments ou *bon eür*, devenu *bonheur*, ou les mauvais *mal eür* devenus *malheur* ?
15. Les humains ont appris combien de temps peut durer une vie de la naissance à la mort. Pas plus de quarante ans, avec des exceptions d'autant plus remarquées que la longévité d'une vieille personne est grande et donc respectée, voire vénérée, et d'autres d'autant plus dramatiques si on meurt plus jeunes. Et se poser la question fondamentale : qu'est ce qui se passe après la mort ? Que deviennent ce qu'on a appris, ce qu'on a pensé et ce qu'on pense ? Mais là, c'est la question du salut et je sors du sujet.

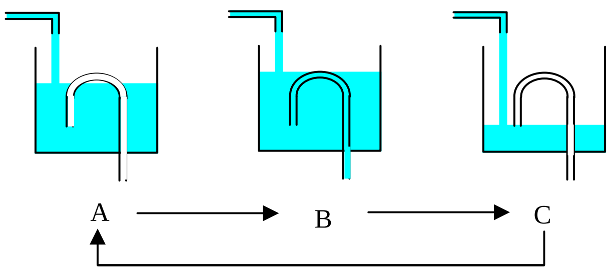
Horloges construites demains humaines

16. Concrètement, comment diviser un jour, solaire ou stellaire, en parties égales ? On a beau voir et interpréter les mouvements célestes comme circulaires *uniformes*, c'est-à-dire sur de gigantesques cercles inaccessibles, avec un pieu et une corde ? Dans le ciel aucun mouvement ne se répète en un temps moindre qu'un jour.
Il a fallu faire confiance en des mouvements nouveaux, admissibles comme périodiques et fabriqués par le génie humain et mis à l'abri dans une *loge*, une loge pour le compteurs des heures ou *horloge*. Les plus vieilles horloges sont peut-être encore enfouies sur des sites archéologiques non encore découverts.

Avec de l'eau

17. Dans une *horloge hydrauliques*, un cylindre est rempli en un jour par un filet d'eau venu du captage d'une source, d'un ruisseau ou d'une rivière.
La géométrie est aussi ancienne que le néolithique, l'ère de l'agriculture et de l'élevage, car il devint indispensable de mesurer la terre (*géo metron* disaient les Grecs) et la géométrie, avec ses théorèmes dont celui dit de Thalès a permis la division de la hauteur du cylindre en autant de parties égales qu'on veut du moment qu'on puisse les voir et les compter.
Si les Grecs n'ont pas inventé la géométrie, ce sont eux qui les premiers eurent l'idée d'organiser les discussions de cette discipline dans des lieux publics, susceptibles d'être écoutés et entendus par n'importe quel passant qui en avait le temps. C'est cette raison qui fit de la géométrie grecque la plus célèbre du monde, ce qui est une grande injustice pour des nombreuses cultures du passé et du présent qui se sont épanouies sur tous les continents.
18. Mais le cylindre de l'horloge à eau, il faut surveiller quand il est rempli, et le vider sans … perdre du temps. L'attention humaine étant ce qu'elle est, aussi peu fiable que sa mémoire, il a fallu *automatiser* le processus, ce fut possible par l'invention du *siphon*.

Relaxations



Vase de Tantale
A : remplissage
B : vidange
C : désamorçage

Fig. 1

19. Le cylindre (fig. 1) se remplit, *en même temps* l'eau monte dans un tube soudé à la base, vertical et montant aussi haut que le cylindre, puis coudé en "U" et descendant plus bas que la base du cylindre vers le sol. En montant, l'eau mouille la face interne de la paroi du tube, franchit le coude en "U" et le mouillage l'attire vers le bas et fait vider totalement le cylindre, qui ensuite commence à se remplir à nouveau. C'est le principe du *vase de Tantale*. C'est une *oscillation de relaxation*, sans doute la plus ancienne de l'histoire de l'humanité.

20. Un autre système mécanique et hydraulique très simple consiste un récipient à deux compartiments sous un jet d'eau. L'objet peut basculer sur un axe horizontal et présenter alternativement sous le jet un des compartiments pendant que l'autre se vide et il suffit de compter les bascules.
On connaît aussi la cuve basculante. La vue de la figure 2 vous fait deviner comment elle fonctionne.
Note : un système mécanique de comptage des basculements peut être mis en plac

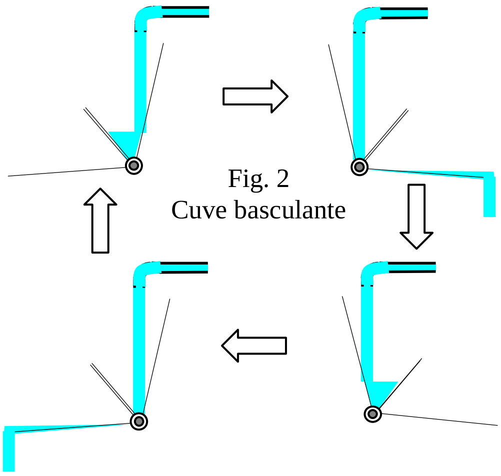


Fig. 2
Cuve basculante

21. Depuis les horloges hydrauliques, une grande variété d'autres oscillateurs de relaxation ont été inventés.

22. Tenez un bâton par son milieu. Faites-le tourner horizontalement d'un angle donné dans un sens, pui du même angle dans l'autre sens et répétez autant de fois que vous voulez ou pouvez : c'est un *foliot*. Les oscillations sembles régulières périodiques, mais vous vous fatiguerez vite.

Au moyen âge on a inventé le foliot (fig. 3a à 3c) aux oscillations entretenues par relaxation. Une masse suspendue à une corde enroulée sur un tambour à l'axe horizontal entraînant une roue dentée qui entretient les oscillations du foliot par une astuce mécanique. C'est un *oscillateur de relaxation*.

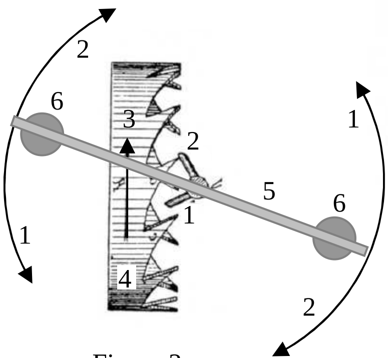


Figure 3a

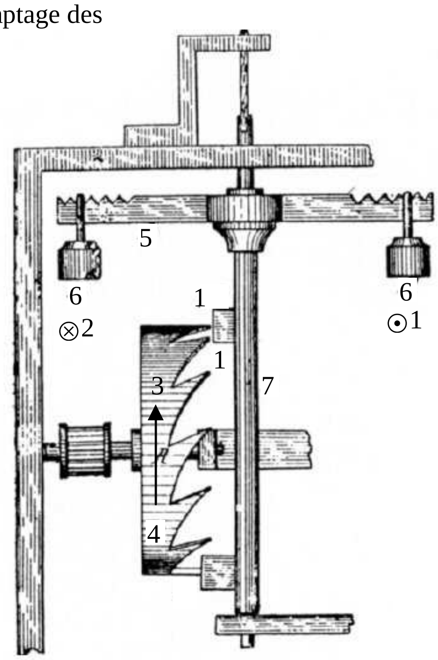


Figure 3b

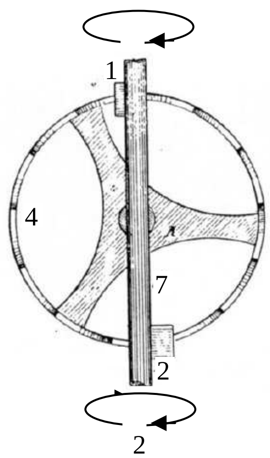


Figure 3c

Temps	Oscillations
T	1
1	*f*
t	*N*
Tableau de proportion	

Période *T*, et fréquence *f*, temps *t* et nombre *n* d'oscillations

1 Sens de rotation du foliot et la came qui l'entraîne
2 Sens de rotation du foliot et la came qui l'entraîne
3 Sens de rotation de la couronne
4 Couronne
5 Foliot
6 Masse de réglage de la période du foliot
7 Axe de rotation du foliot
8 Cames
⊙ Pointe de flèche
⊗ Empennage de flèche

Course à la précision

23. Quand on exprime un temps en nombre d'oscillations, une *incertitude numérique absolue* s'impose toujours d'évidence : le résultat est et ne peut être connu qu'à une oscillation près. Compter 150 oscillations de cette horloge ou 1500 oscillations de cette autre horloge pour une même durée fait passer l'*incertitude numérique relative* de 1/150 à 1/1500. Cela veut dire qu'on a une incertitude d'une unité de temps sur 150 avec la première horloge, et d'une unité de temps sur 1500 avec la deuxième horloge, autant dire que le deuxième instrument est dix de fois plus précis que le premier.
C'est la raison de la course aux hautes fréquences.

24. Les foliots du moyen âge avaient une période de l'ordre de la seconde. Si on peut compter le nombre d'oscillations en une journée, alors l'incertitude numérique relative serait de $1/(24 \times 60 \times 60) = 1/86400$, ce qui paraît une déjà belle précision. Mais c'est sans compter sur les défauts mécaniques de ce type d'horloge, comme le démontrèrent les variations du comptage des oscillations d'un jour à l'autre, quelle que soit l'attention et les soins d'entretien de l'instrument par l'horloger.

Les pendules

25. Huygens découvrit l'*isochronisme* en 1659 : la période d'oscillation de l'extrémité d'un pendule – une simple masse suspendue à un fil – semble constante quelle que soit son amplitude et quelle que soit la masse (tant que le fil ne casse pas !).

26. La *fréquence* exprimée en hertz (Hz, en l'honneur de Henrich Hertz, qui en 1886–1888 mit en évidence les ondes électromagnétiques prédites par James Clerk Maxwell dans la décennie précédente) est défini comme le nombre d'oscillations par unité de temps, la seconde, elle-même définie par les anciens comme le résultat de la division du jour en $24 \times 60 \times 60$ parties égales.

27. La *période* d'un pendule de 1 mètre de long est de deux secondes, ce qui fait une fréquence de 0,5 Hz.

28. La fréquence augmente si on raccourcit le fil et diminue si on le rallonge. Des artisans horlogers remplacèrent le foliot par un pendule, lui-même composé d'une tige à la place du fil et de la masse dont la position sur la tige est réglable, ce qui permet d'ajuster au mieux la fréquence.
Les incertitudes sur les comptages des oscillations se sont fortement réduites.

29. Mais il reste les frottements de la tige sur son axe horizontal de rotation et l'usure qu'ils occasionnent. Cet axe est alors remplacé par une lame métallique élastique, profitant ainsi de l'invention métallurgique fondamentale du moyen âge, l'*acier à ressort*, qui permit l'essor et l'engouement spectaculaire des nobles et bourgeois pour les horloges.

La terrible question des longitudes

30. Combien de marins disparurent à cause d'une mauvaise estimation de la position de leur bateau par le capitaine ? Et pourquoi tous ces drames de la mer, même en l'absence de mauvais temps ?
C'est parce que si la latitude est aisément identifiable tant que le ciel est clair le jour ou la nuit (il suffit de mesurer l'élévation d'un astre au-dessus de l'horizon et se tournant vers l'équateur, lui-même repérable avec une aiguille aimantée), mais pour connaître la longitude il faut connaître l'heure.

31. Si la précision d'une horloge à pendule est bien meilleure que celle d'un foliot, en mer, avec le roulis et le tangage, c'est impossible.
L'histoire de l'invention de la montre en Grande Bretagne au XVIIIe siècle mériterait à elle seule tout un article, tant les autorités scientifiques de ce pays méprisèrent son créateur, l'artisan ébéniste – j'ai bien dit un ébéniste – John Harrison, qui concilia les principes du foliot et de l'acier à ressort. Si la pesanteur fait osciller un pendule, c'est un ressort en spirale qui fait osciller en rotation la pièce jouant le rôle du foliot. De même un autre ressort remplace la masse suspendue à un fil enroulé sur le tambour pour l'entretien des oscillations. Après moulte tentatives sans cesse couronnées de succès avec ses horloges, d'abord en bois puis en métal, de plus en plus petites au point de pouvoir les installer dans une petite boîte, ce qui les rend de plus en plus précises, et surtout de moins en moins sensibles aux mouvements d'un bateau, quand sa *watch* (montre) H5 fut présentée au roi en 1772 avec son incertitude d'une demi seconde sur un jour, le souverain de son autorité assura enfin le triomphe définitif de Harrison à l'âge de 80 ans, soit trois ans avant sa mort.

L'électricité

32. Au XIXe siècle apparurent les oscillateurs électromécaniques (fig. 5). Le rôle des ressorts sont joués par une pile pour l'entretien des oscillations assurées par un dispositif de relaxation analogue à celui d'une sonnette électrique.

L'électronique

33. La découverte du transistor a permis l'invention d'un type d'oscillateur nouveau. D'abord, il permit la création de *portes logiques* "et", "ou" et "non" dont voici les *tables de vérité*.

Entrées		Sortie
0	0	0
0	1	0
1	1	1
1	0	0

Tab. 1
Porte logique "et"

Entrées		Sortie
0	0	0
0	1	1
1	1	1
1	0	1

Tab. 2
Porte logique "ou"

Entrée	Sortie
0	1
1	0

Tab 3
Porte logique "non"

Avec ces trois portes logiques, on peut composer toutes les réponses logiques possibles avec deux entrées et une sortie. Il suffit de brancher correctement les entrées et les sorties sur plusieurs portes. Le montage suivant est toujours un oscillateur de relaxation.

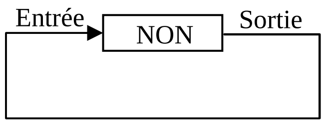


Figure 4 :
logique d'un oscillateur de relaxation

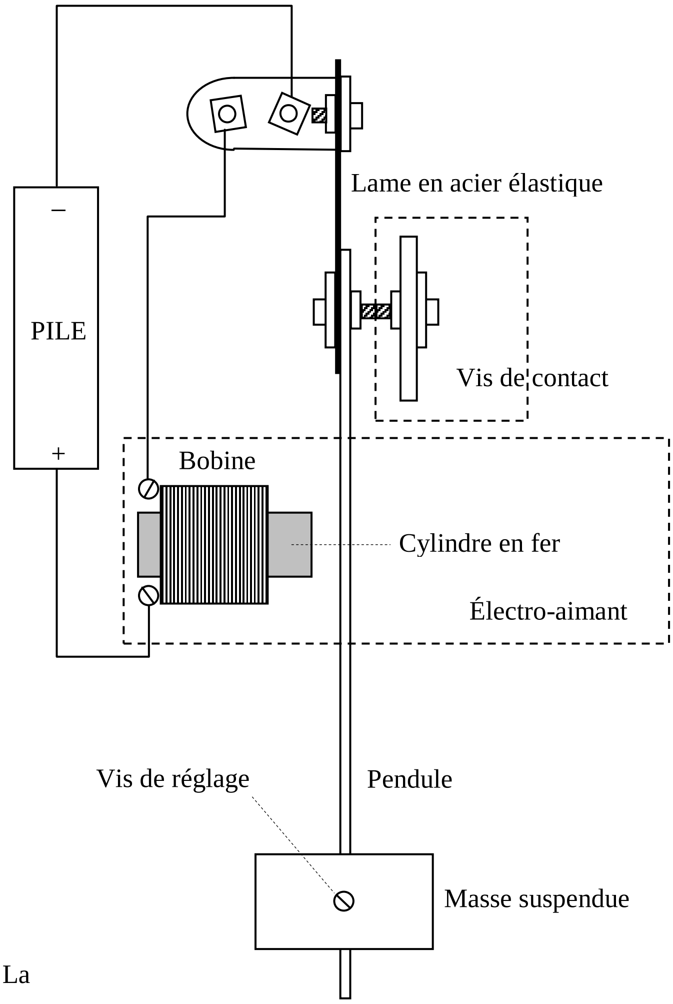


Figure 5 :
Pendule électrique

34. Si (fig. 4) l'entrée dit "1", la sortie dit "0", donc l'entrée change et dit "0", donc la sortie change et dit "1 et le cycle recommence. Entre le changement de l'entrée et celui de la sortie se produit toujours un retard qui est la période de l'oscillateur.

35. Comme ce qui oscille ce sont des électrons très légers (0,05 % de la masse de la matière), la fréquence est très élevée au point de risquer de dégrader le circuit par répétition de coupures de courant trop brusques.
Le montage suivant (fig. 6) permet de changer ce retard. Ici, C est un condensateur, un espace isolant encadré par deux surfaces conductrices, et *R* une résistance au passage du courant électrique. La charge *q* de C, exprimée en **coulombs** monte selon une loi mathématique exponentielle à partir de la résistance *R* exprimée en **ohms** et de la capacité *C* du condensateur, exprimée en **farads**, et représentée graphiquement ci-dessous.

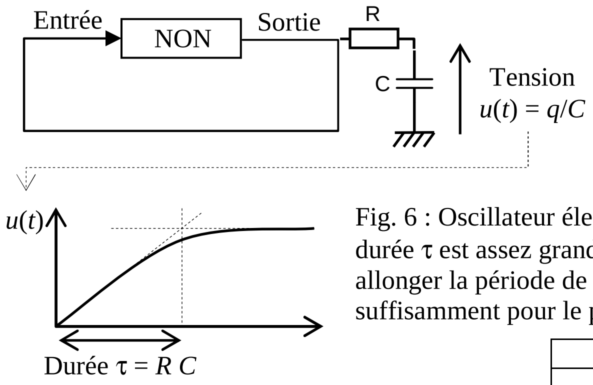


Fig. 6 : Oscillateur électrique. La durée τ est assez grande pour allonger la période de l'oscillateur suffisamment pour le protéger.

36. Les cristaux de quartz ont la faculté de se contracter quand on en met une lame entre les plaques du condensateur C, ce qui permet de mieux contrôler le temps τ tout en donnant des fréquences élevées de l'ordre de 455 000, 9 000, ou 10 700 000 Hz avec donc une erreur relative de 1/455 000, 1/9 000, ou 1/10 700 000, ce qui est déjà un grand progrès.

Unités	Symbole	1 tour	Arc
Degrés d'arc	°	360	*d*
Heures	h	24	*h*
Minutes d'arc	mna	360×60	m_a
Minutes horaires	mnh	24×60	m_h
Secondes d'arc	sa	360×3600	s_a
Secondes horaires	sh	24×3600	s_h
Radians	rd	$2\,\pi$	θ
Périmètre	m	$2\,\pi\,R$	*l*
Note	m = mètre	Tableau de proportion	

Tab. 4 : Unités circulaires standard

Ondes

37. Les ondes sont la propagation dans l'espace des oscillations générées dans une source ou un ensemble de sources données. Imaginez un disque tournant avec une vitesse angulaire constante ω, en radians par seconde.

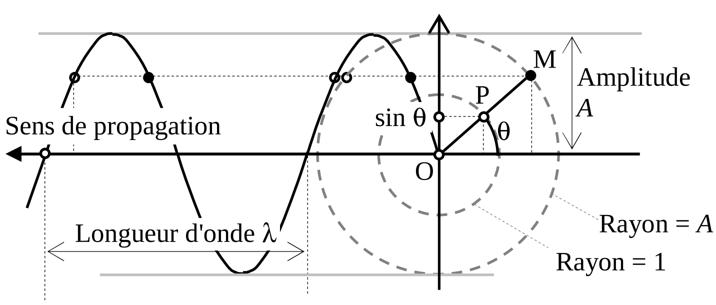
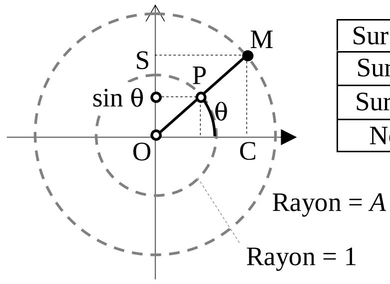


Figure 6 : Onde sinusoïdale

Suivons la projection S d'un point M marqué sur le bord sur un axe vertical placé à côté : ce point suit un *mouvement sinusoïdal* dont la période est exactement celle du disque. Attachons en pensée une corde idéalement souple à cette projection et suffisamment légère pour être suspendue par la simple poussée d'Archimède de l'air. Alors on verrait l'oscillation initiée par M se propager tout le long de la corde à une certaine vitesse c.

38. Le tableau 6 permet de retrouver toutes les relations mathématiques entre les grandeurs ondulatoires sans avoir besoin d'une mémoire d'éléphant : choisissez quatre cases aux quatre coins d'un rectangle et appliquez les bonnes règles des tableaux de proportion qui firent notre plaisir pendant nos années de collégien, les "produits en croix", la "quatrième proportionnelle dite "règle de trois". Par exemple $\theta \times 1 = \omega\, t$, $\omega = 2\, \pi\, \nu$ ou encore $\lambda = c/\nu$. La seule chose à se souvenir est … de savoir construire le tableau.
Nommez les colonnes, écrivez 1 sur les cases d'une diagonale, puis dans les autres les symboles que vous connaissez et hop ! C'est fait. Les autres tableaux de proportion de cet article ont le même usage.



Sur OM	$OP = 1$	$OM = A$
Sur OS	$\sin \theta$	$OS = y$
Sur OC	$\cos \theta$	$OC = x$
Note	Tableau de proportion	

Fig. 7 et tab. 5 : Trigonométrie

Temps	Espace	Oscillations	Angle	Note
1	c ou u	f ou ν	ω	Une unité de temps
	1		n	Une unité de longueur
T	λ	1	$2\,\pi$	Une oscillation
			1	Un radian
t	x	n	θ	Situation quelconque
Tableau de proportion				Note

Tab. 6 : Grandeurs des ondes

La lumière a une vitesse d'escargot

39. Pour mesurer une vitesse, on choisit une distance, la mesure et mesure le temps nécessaire pour la franchir. Pour le son ce fut facile : s'éloigner d'un canon d'une distance connue équipé d'une horloge, donner un signal en agissant un drapeau, démarrer le chronomètre à la vue de la fumée sortie du fût et le stopper au son du canon. Ceci n'est possible parce qu'*en apparence* la lumière se propage à une vitesse telle qu'on la croît infinie. Au XVIIe siècle, on ne pouvait pas mesurer cette vitesse par la méthode précédente. C'est pourquoi, seul un astronome pouvait prouver à l'humanité que la vitesse de la lumière est finie et mesurable. Römer, en 1676, travaillant sur les éclipses du satellite Io de Jupiter, il remarqua que ces événements se produisaient tantôt « à l'heure prévue » (ses prévisions selon les lois de Kepler se vérifiaient), tantôt 10 minutes en avance, et d'autres fois 10 minutes en retard.

Temps	Distance
t	d
1	c
Tableau de proportion	

Tab. 7 Vitesse de la lumière

40. La seule explication possible fut que la lumière *met un certain temps* pour se propager du système jovien jusqu'à l'observateur (fig. 8).

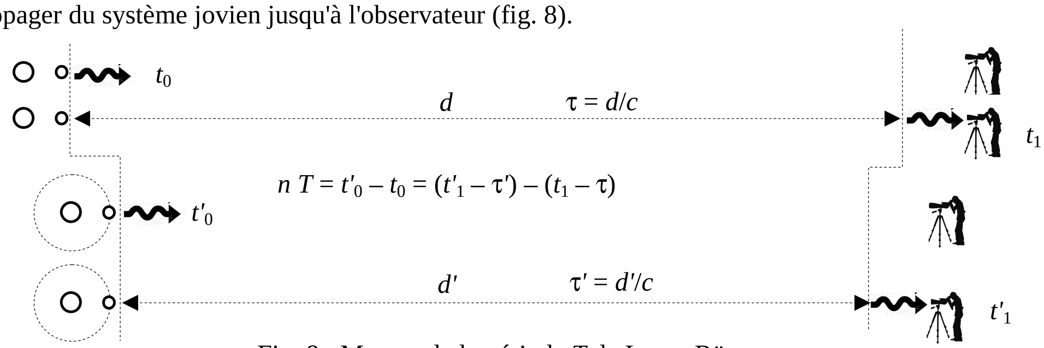


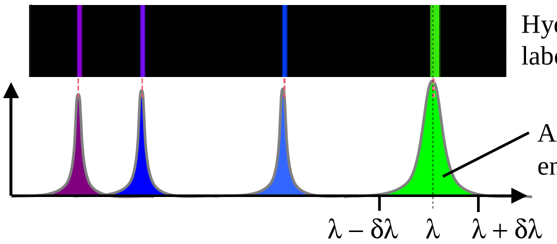
Fig. 8 : Mesure de la période T de Io par Römer

Soit un temps $n\,T$ de n périodes d'Io à mesurer. Depuis la figure 8 on peut déduire les expressions $t_1 - \tau = t_0$, $t'_1 - \tau' = t'_0$, $t'_0 - t_0 = (t'_1 - \tau') - (t_1 - \tau)$ et enfin $n\,T = t'_0 - t_0 = (t'_1 - d'/c) - (t_1 - d/c)$.
Une première série de mesures sous la condition $d = d'$ donne $n\,T = t'_0 - t_0 = (t'_1 - \tau) - (t_1 - \tau) = t'_1 - t_1$ dont on déduit $T = (t'_1 - t_1) / N$. Résultat $T = 2459$ mn.
En général, avec un peu d'algèbre trouver $n\,T = (t'_1 - t_1) + (d - d')\,/c$. On résout cette équation d'inconnue c : une addition de $(d - d')\,/c$ et une soustraction de $n\,T$ aux deux membres, puis une multiplication par c et enfin une division par $t'_1 - t_1 - n\,T$ donne $c = \dfrac{d - d'}{t'_1 - t_1 - T}$.
Résultat avec les chiffres de Römer : $t'_1 - t_1 - n\,T = 22$ mn, $d - d' = 290\,400\,000$ km, donc $c = 290\,400\,000$ km /(22 mn × 60 s/mn) = 220 000 km/s.
Ici, $d - d'$ correspondait au diamètre de l'orbite de la terre mal connue à l'époque.

Oscillations atomiques

41. Depuis l'irruption de la physique quantique démarrée avec l'idée aussi simple que révolutionnaire de Max Planck en 1900, la précision des horloges a fait ce qu'on peut bien appeler un grand bond en avant.

Les théories des physiciens du XIXe siècle butaient sur ce qui se passe dans un corps d'où aucune énergie ne peut sortir, dit *corps noir*. L'idée de départ est d'admettre que dans ces corps les ondes électromagnétiques sont réfléchies par la face interne de sa frontière avec l'extérieur, ce qui engendre à l'intérieur des *ondes stationnaires*.



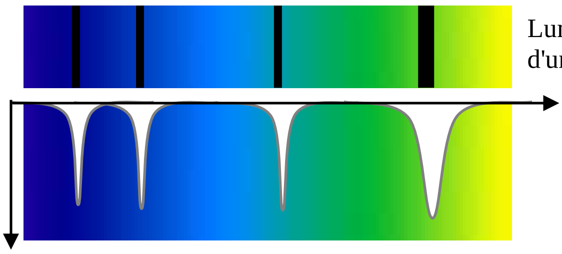
Hydrogène en laboratoire

Aire = puissance entre $\lambda - \delta\lambda$ et $\lambda + \delta\lambda$

Temps	Énergie
t	E
1	P

Tab. 8 : énergie E et puissance P

Fig. 9: interprétation d'un spectre d'émission



Lumière d'une étoile

Aire	Puissance
A	P
1	K

Tab. 9 : facteur d'échelle entre puissance et aire

Une raie est interprétée par $h\,\nu = E_2 - E_1$

Fig. 10 : interprétation d'un spectre d'absorption

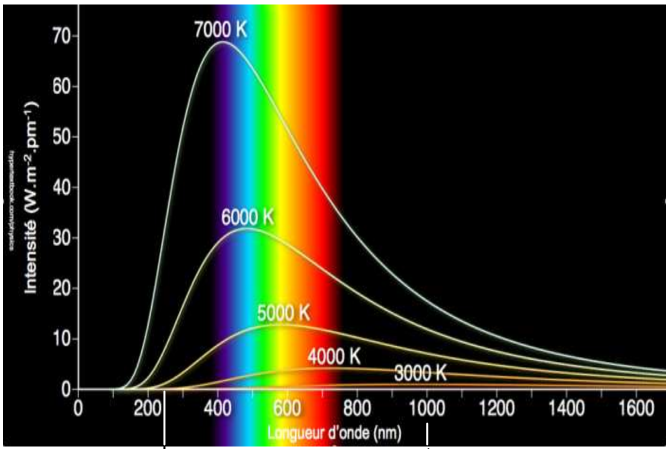


Fig. 11 Spectre d'un corps noir

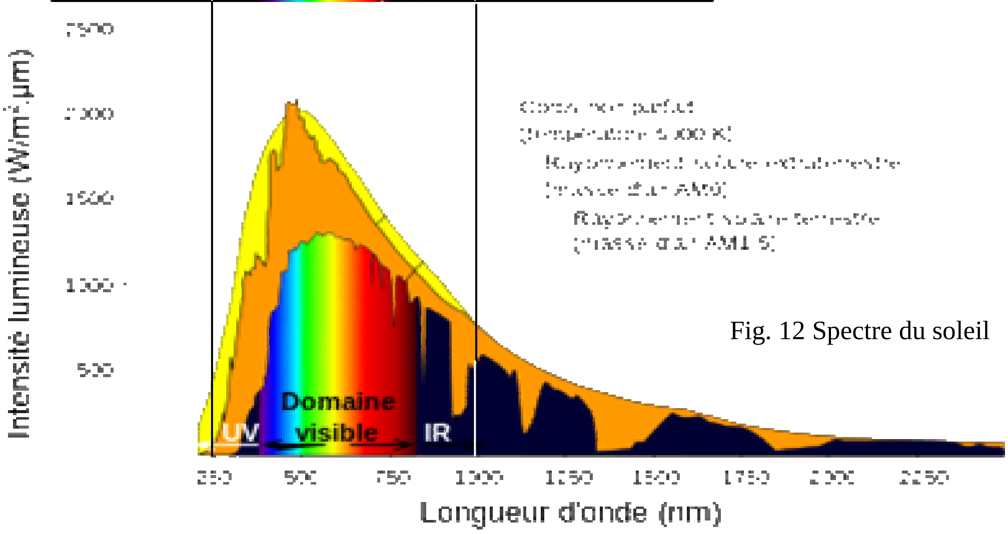


Fig. 12 Spectre du soleil

42. Un *spectre* (fig. 9 à 12) est le résultat de l'analyse de la répartition de l'énergie des ondes selon leur longueur d'onde λ donc de leur fréquence ν (tableau 6). Les formules mathématiques déduites de cette théorie sont contredites par les spectres des corps noirs.

43. Ce fut Max Planck qui en 1900 proposa pour la première fois la bonne explication : un oscillateur électromagnétique n'échange son énergie que par paquets indivisibles tous de la même valeur. Cette valeur est proportionnelle à la fréquence, ce que dit la plus célèbre formule de la physique du siècle passé $E = h\,\nu$ aux côtés de celle d'Albert Einstein reliant la masse et l'énergie d'un corps au repos $E = m\,c^2$ publiée en 1905.

44. Les spectroscopistes étudièrent alors en laboratoire la lumière émise par n'importe quelle matière chauffée par l'électricité, puis la lumière venue des corps célestes, quelle que soit la distance qui les sépare de nous.

45. Un tube rempli d'un substance donnée mise à l'état gazeux en élevant sa température par un courant électrique entre anode et cathode a deux effets : séparer les atomes les uns des autres dans les molécules et émettre de la lumière.

46. Depuis l'hypothèse de Planck, on admet que l'énergie d'un atome ne peut cesser de varier que sur une des valeurs d'un ensemble discret (c'est-à-dire dont on puisse numéroter les éléments) qui caractérise l'espèce chimique. L'analyse des spectres de la lumière venue des astres a permis de savoir si cette espèce y est présente , tout en nous informant sur la température de sa surface.

47. Un écart ΔE (la lettre Δ est delta veut dire "différence") entre deux niveaux d'énergie $E_2 - E_1$ d'un émetteur de lumière, atome, ion ou molécule est lié à la fréquence de l'onde émise ou absorbée selon la loi de Planck $h\,\nu = E_2 - E_1$.

48. Mais attention : les valeurs E_2 et E_1 changent constamment selon les mouvements et l'environnement immédiat (les autres ions ou molécules) de l'émetteur, car une part de son énergie est dans ces mouvements (on l'appelle énergie cinétique) et dans cet environnement (on parle d'énergie potentielle), ce qui occasionne une variation aléatoire de E_2 et E_1.

49. La valeur de la fréquence ν de la formule de Planck $h\,\nu = E_2 - E_1$ est donc affectée par cette agitation désordonnée. Disons à la louche comme Boltzmann le suggéra en 1877 que les variations aléatoires de E_2 et E_1 est proportionnelle à la température selon sa formule $k\,T$ où T est cette température en kelvins (qui se déduit des degrés centigrades par $T_{\text{kelvins}} = T_{\text{degrés C}} + 273{,}15$ unités). C'est essentiellement ce phénomène qui limite la précision des mesures de la fréquence.

Des harmoniques pas seulement musicales

50. Fourier (vers 1811) démontra par les mathématiques que tout mouvement périodique sur un plan est décomposable en une superposition de mouvements circulaires uniformes (fig. 13), exactement comme les cycles et épicycles du géomètre et astronome de l'antiquité *Ptolémée*, mais à la différence que les mouvements superposés aient une fréquence (dite *harmonique*) multiple entière d'une fréquence de référence (dite *fondamentale*).
L'ordonnée du point noir de la fig. 10 est donnée par une formule dite *série de Fourier* $y = \sum_n A_n \sin 2\,\pi\,(n\,\nu)\,t$ où n parcoure l'ensemble $\mathbb{N}$ des nombres entiers naturels, voire celui $\mathbb{Z}$ des entiers relatifs (ils peuvent être négatifs).

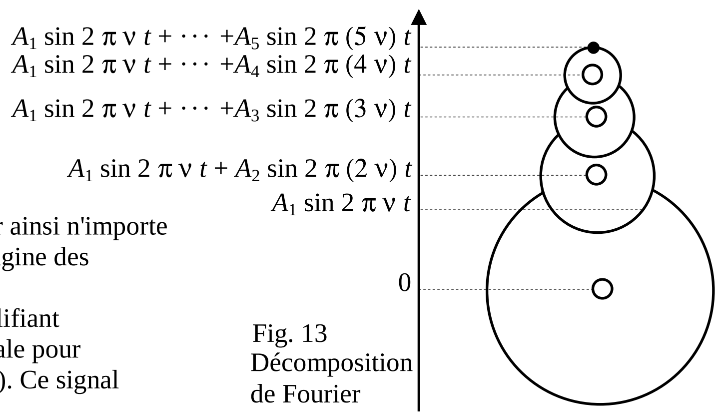


Fig. 13 Décomposition de Fourier

51. En particulier, en théorie, on peut décomposer ainsi n'importe quel son, quel qu'en soit son timbre. C'est l'origine des *synthétiseurs* en musique.

52. Un cas particulier est le signal obtenu en amplifiant suffisamment une oscillation sinusoïdale initiale pour "saturer" par exemple un haut-parleur (fig. 11). Ce signal saturé a sa décomposition de Fourier.

53. Un filtrage électronique sélectionne une des harmonique, la deuxième : il en sort un signal $A_2 \sin 2\,\pi\,(2\,\nu)\,t$ de fréquence double de l'originale. On recommence le procédé autant de fois qu'on veut, ce qui multiplie la fréquence originale par 2^k où k est le nombre de montages en cascade, entendons ici par "montage" un amplificateur à saturation suivi d'un filtre.

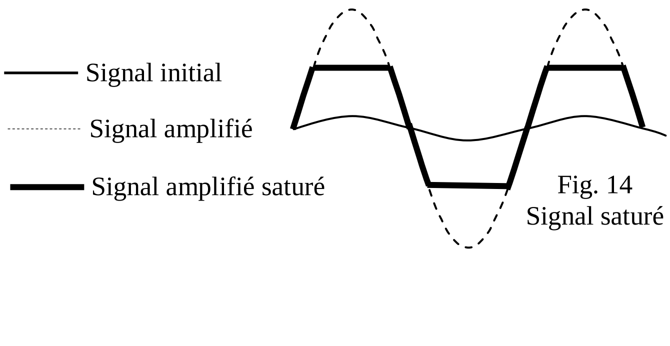


Fig. 14 Signal saturé

54. Cette cascade de "doubleurs de fréquence" n'a de limite que la résistance du matériel aux très hautes fréquences. Par exemple, si un oscillateur Q à quartz donne du 10 000 000 Hz, une cascade de dix doubleurs de fréquence sortira (10 000 000 $\times$ 2^{10} = 10 240 000 000) Hz.

55. Un saut électronique d'un atome de césium (note 1) crée une lumière de fréquence 9 192 631 770 Hz, soit une valeur comparable à celle de notre dispositif électronique. C'est une opportunité pour un électronicien : il sait concevoir un type de comparateur de fréquences et l'utiliser pour asservir l'oscillateur Q exactement sur la fréquence du césium. La sortie de l'oscillateur Q est ensuite branchée sur un compteur d'oscillations qui affichera le nombre de fois où cette valeur 9 192 631 770 sera atteinte, c'est-à-dire le nombre de secondes mesuré.

Très basses températures

56. Le brouillage des fréquences mesurables par la température et l'agitation atomique désordonnée expliqué plus haut peut être atténué fortement grâce aux exploits techniques récents dans le domaine de la réfrigération.
De l'hélium, comprimé par un compresseur C (fig. 8) et refroidi dans le serpentin S (fig. 7), entre en A dans l'échangeur, à la température T_1 et sous la pression p_1 ; l'enthalpie (quantité de chaleur possédée par le gaz) dans ces conditions est H_1. Il subit dans un étranglement E une détente dite de Joule et Kelvin, qui abaisse sa température. Remontant dans l'échangeur non pas dans le serpentin, mais autour de lui, le fluide refroidit alors le gaz avant qu'il ne subisse la détente, et le cycle recommence jusqu'à ce qu'un régime permanent soit atteint (les températures se stabilisent) ou la détente entraîne cette fois une condensation partielle de l'hélium. Celui-ci est entre T_2 = 5 et 10 kelvins sous une pression P_2 et possède l'enthalpie H_2. Il n'y a pas de pièce tournante hors du compresseur dans cet appareil.

Fig. 15 Un serpentin

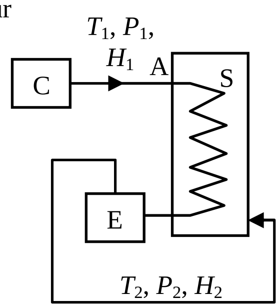


Fig. 16 Réfrigération

Un froid de laser

57. Un laser est une source de lumière sinusoïdale de très haute pureté en fréquence. Imaginez six lasers projetant leur faisceau sur une unique petite zone de l'espace où est présent la vapeur de césium et disposés dans les six orientations de l'espace, genre est, nord, est, sud, zénith et nadir. Si un atome est immobile, la transition entre deux de ses niveaux d'énergie est exactement une $h\,\nu = E_2 - E_1$ où ν a une valeur légèrement plus grande que la fréquence ν' des lasers. Si l'atome avance vers un des lasers, par effet Doppler la fréquence ν' augmente d'une petite valeur suffisante pour atteindre celle de la transition, absorbe un de ses photons et son énergie, et *en même temps* est bousculé vers l'arrière et s'arrête ou retourne rejoindre les autres atomes. Tout se passe comme si les atomes étaient englués dans une mélasse optique (fig. 17). Et là à la prochaine collision les atomes excités par les lasers perdent cette énergie tout en étant presque immobiles.

Le paradoxe dans cette expérience est un refroidissement des atomes par projection d'énergie sur eux. La physique quantique a décidément une logique bien loin du sens commun.
Par ce processus on peut atteint jusqu'à 0,006 kelvins.

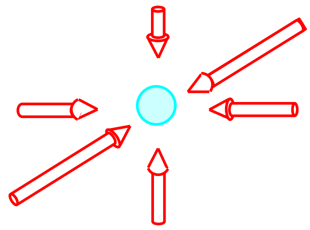


Fig. 17 Mélasse optique

Comme Sisyphe

58. Fortuitement, une équipe de chercheurs de l'École normale supérieure et du Collège de France constata que si la mélasse est dans un espace clos où vibre une onde stationnaire, la température descend bien plus bas encore. L'explication tient à un effet de hausse ou de baisse des niveaux d'énergie E_1 et E_2 en présence d'un champ électrique. Une faible baisse, mais qui induit un "effet Sisyphe".

59. Une onde stationnaire crée un champ oscillant ne se propageant pas, un réseau de creux et de bosses périodique comme dans un cristal. Quand un atome monte sur une bosse, son niveau $E_{1\text{ ou }2}$ monte un peu et quand il va dans un creux, il baisse. De plus les creux pour E_1 sont aux endroits des bosses pour E_2 et vice-versa. Si un atome grimpe sur une bosse augmentant E_1, E_2 baisse et l'écart atteint une valeur $E_1 - E_2$ exactement égale à $h\,\nu$ où ν est la fréquence d'un septième faisceau et peut absorber un de ses photons. Ensuite, le remplacement de la bosse par le creux suffit ensuite pour initier la chute de E_1 (rehaussé) vers E_2 (abaissé). Mais la montée sur la bosse avait auparavant réduit presque à zéro la vitesse de l'atome, ce qui améliore sensiblement son immobilité donc la mesure de la fréquence d'émission. On arrive ainsi à une valeur cent millions de fois plus basse que la température ambiante (qui est d'environ 300 kelvins), et atteindre 3 millionièmes de kelvin.
(Source : http://www.phys.ens.fr/~dalibard/publi2/larecherche_94.pdf)

Le temps et l'entropie

60. Mais pourquoi ne peut-on pas atteindre exactement le zéro kelvin ? Pourquoi tant d'efforts pour s'en approcher d'une si petite quantité ? La réponse est tout simplement dans les origines historiques de la thermodynamique. Sadi Carnot vers 1824 dans sa *Réflexions sur la puissance motrice du feu* accepta la théorie des physiciens français sur la nature de la chaleur : un fluide subtil (de masse volumique nulle) s'écoulant spontanément du

chaud vers le froid à travers les machines à vapeur générant du travail disponible comme dans les moulins à eau la chute du liquide d'un niveau haut vers un niveau bas. Par analogie avec le niveau de la mer choisi comme référence il postula qu'il doit exister une température plus basse que toute autre (le zéro absolu). Le rendement maximal du moulin est donc proportionnel au quotient $(A_{\text{haut}} - A_{\text{bas}}) / A_{\text{bas}}$ où $A_{\text{haut ou bas}}$ désigne l'altitude haute ou basse comptées par rapport au niveau de la mer. Le rendement d'une machine à vapeur est donc proportionnelle à $(T_{\text{haut}} - T_{\text{bas}}) / T_{\text{bas}}$ où $T_{\text{haut ou bas}}$ sont les températures chaude (dans le foyer) et froide (dans l'environnement). Ce *théorème de Carnot* n'a à ce jour jamais été contredit par la moindre expérience de toute l'histoire de la révolution industrielle.

61. Et pourtant, la théorie française de la chaleur a été très tôt contredite ! C'était une vraie théorie scientifique, c'est-à-dire réfutable, et réfutée suite à un fait nouveau contradictoire : les mesures ont montré que de la chaleur disparaît entre le chaud et le froid (Benjamin Thomson, compte Rumford, 1798, en étudiant l'alésage de fûts de canons). Il faut admettre alors que la chaleur disparue est convertie en travail. C'était le point de vue des anglo-saxons : travail et chaleur sont dans les mouvements mécaniques, microscopiques (fig. 10) pour le premier et macroscopique pour la seconde, la limite entre ces deux mots étant la visibilité au microscope optique qui se situe vers le millième de millimètre (mouvement brownien, 1827).

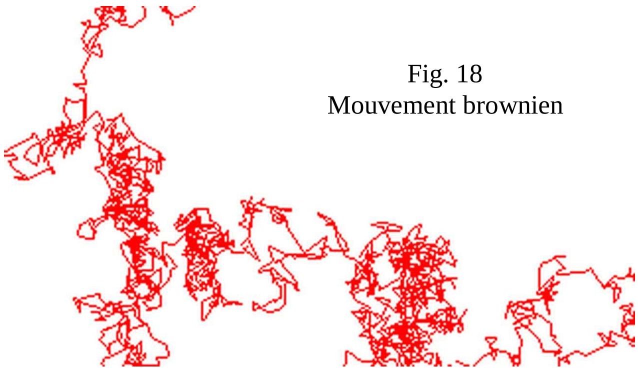


Fig. 18
Mouvement brownien

62. Clausius a réussi en 1850 à expliquer l'origine du théorème de Carnot sur une idée simple : pour un système de corps isolé (sans échange d'énergie avec l'extérieur), qu'il y ait échange entre chaleur et travail ou pas, tout s'arrête quand les températures des corps sont toutes égales entre elles. On peut démontrer alors que la somme algébrique des quotients des variations de quantité de chaleur des corps par leur température augmente toujours, ce qui s'écrit

$\sum_{\text{corps}} \Delta Q/T \geqslant 0$. Ici, Δ veut dire "variation de", Q est la quantité de chaleur possédée par un des corps et T sa température absolue (égale à la température en degrés centigrades augmentée de 273,15). En 1865 Clausius nommé la quantité à gauche de la formule *variation de l'entropie* du système de corps. Le cas le plus commun de système est un corps dans son environnement : $\Delta Q/T + \Delta Q'/T' \geqslant 0$. Le tout étant isolé on a en plus $\Delta Q + \Delta Q' = W$ où W est un travail, c'est-à-dire une somme de multiplications d'une force par un déplacement mécanique.

63. Depuis l'invention des calorimètres (par Lavoisier en 1783), on avait établi la définition de la quantité de chaleur échangée par $\Delta Q = c\, \Delta T$ où c est la capacité calorifique d'un corps. On a donc $\Delta Q' \geqslant - T'\, c\, \Delta T / T$. Si T est la température du corps à refroidir, c'est un diviseur très petit et tendant vers zéro. D'autre part ΔT est algébriquement négatif donc $\Delta Q'$ est à la fois positif et très grand, tendant vers l'infini, l'infini étant une valeur inaccessible en physique.

Le temps et l'entropie

64. La loi de Clausius pose la question philosophique de l'*irréversibilité du temps*. Dans les systèmes isolés l'entropie est toujours croissante ou à la limite constante et égale à sa valeur la plus grande possible. Pour la faite baisser, *il faut intervenir*, c'est-à-dire rompre l'isolement.
Or on connaît une autre irréversibilité liée au hasard. Une bonne analogie est la chambre d'un enfant : si personne ne s'occupe de ce lieu privé par rapport à la famille, le désordre ne peut qu'augmenter. Si les parents insistent pour faire ranger cette chambre, l'enfant doit *travailler* soit dépenser une partie de son énergie.

65. Ludwig Boltzmann, en 1872 démontre à partir des lois du hasard que les molécules d'un corps isolé ont toujours tendance à augmenter le désordre de leurs positions et de leurs vitesses, ce qui permit plus tard de démontrer une nouvelle définition de l'entropie. Sa formule est
$S = k_B \ln$ (produit des δx) (produit des δp_x).
Commentons-la.

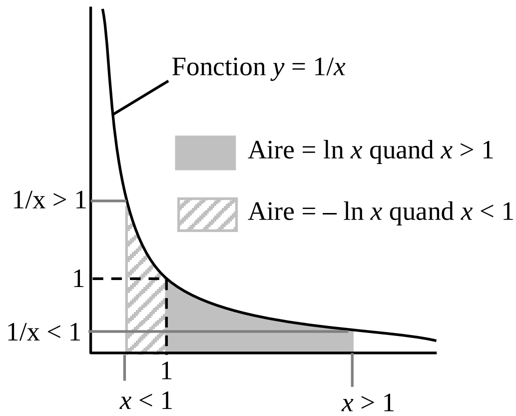


Fig. 19 fonction logarithme

66. En physique S est l'entropie : x est une des trois coordonnées d'un des atomes, $p_x = m\, v_x$ où m est la masse de l'atome et v_x une des

trois composantes de sa vitesse. Enfin k_B est une constante
inventée par Boltzmann et dont la valeur est expérimentale.
En mathématiques, ln est une fonction mathématique représentée sur le fig. 19. Son intérêt est qu'elle transforme une multiplication en addition. En conséquence, le logarithme d'une puissance est celui de la grandeur multiplié par l'exposant parce que $\ln a^n = \ln (a \cdots \times a) = n \ln a$. On démontre en mathématiques que l'équation $\ln e = 1$ d'inconnue e a sa solution proche de $e = 2{,}17$. En physique, le logarithme d'une grandeur n'a pas d'unité. En effet, sur la fig. 19 une aire est la multiplication d'une distance en abscisse par l'ordonnée qui en est l'inverse. Un logarithme ne changera donc pas de valeur si on change l'unité de la grandeur. Le nombre d'atomes est très grand, se compte en nombre de fois la valeur d'Avogadro qui est de l'ordre de 10^{23}, c'est-à-dire cent mille milliards de milliards. Son logarithme est donc de l'ordre de $23 \ln 10 = 23 \times 2{,}17$ = environ 50.

Horloges atomiques

67. En 1955 Louis Essen et Jack Parry avec le *National Physical Laboratory* prototypent une horloge atomique à une fréquence de 9 192 631 830 ± 10 Hz, ce qui donne une précision d'une seconde sur 30 ans.
Aujourd'hui, de nouveaux procédés permettent d'abaisser cette température à une fraction de kelvin, et là, l'incertitude de la mesure du temps tombe au niveau stupéfiant d'une seconde sur l'âge de l'univers estimé à 13,8 milliards d'années, ce qui fait (ici, **a** veut dire "année", **j** mois, **h** heure et **s** seconde)
$13{,}8 \times 10^9$ **a** $\times$ 365 **j/a** $\times$ 24**h/j** $\times$ 3600 **s/h** = $4{,}35 \times 10^{17}$ secondes.

Mais comment savoir si on a raison
de faire confiance aux atomes de césium ?

68. Personnellement, c'est plutôt aux philosophes qu'aux scientifiques que je poserais la question. En physique, les savants sont persuadés que les oscillations de la lumière émise par des atomes dansant dans un piège de six lasers sont rigoureusement périodiques tout en admettant que cette perfection absolue n'existe pas dans la nature.
C'est comme le mètre (l'instrument) : qu'est-ce qui nous dit que pendant ses mouvements entre deux mesures de longueur il ne se déformerait pas, ne s'allongerait pas, ne se raccourcirait pas ?

Détente

Je pense à cette partie de pétanque dans un film de Marcel Pagnol et la modifie un peu :
- le point, qui l'a marqué ? Ces deux boules sont à égale distance du cochonnet !
Un joueur les compare avec une ficelle.
- Oh là, dis donc, je le vois, ta ficelle est bizarrement élastique !
- Pardon ? Tu doutes de moi, môssieu l'arbitre ?
- Non, pas de toi, idiot ! mais de ta ficelle !
- Té, regarde ! Touche-la ! Elle ne s'étire pas, hein ?
- Ben non !
- Alors finissons la discussion devant le pastis !

Denis Chadebec