

Température, chaleur et thermodynamique

- Définitions
- Température
- La thermodynamique
- Entropie et information
- Énergie libre et surunité



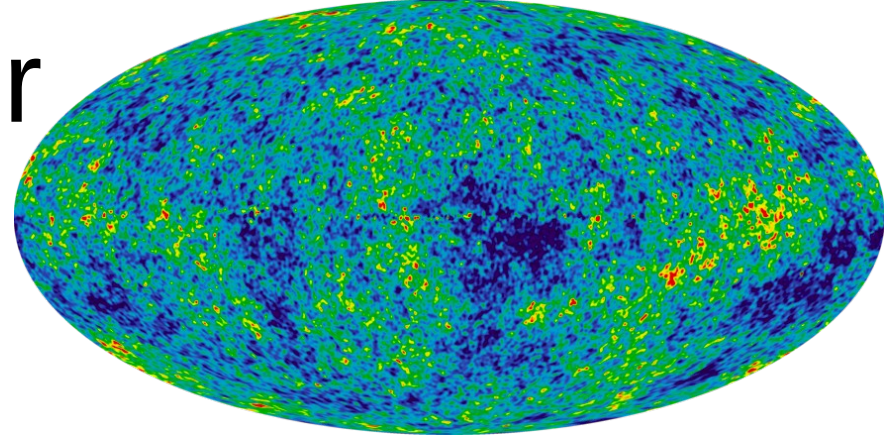
Notions utilisées :

1. Introduction

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipedia sauf mention contraire

Le grand Four Solaire d'Odeillo à Font Romeu a une puissance d'1 MW
→ jusqu'à 3 300 °C

Température et chaleur

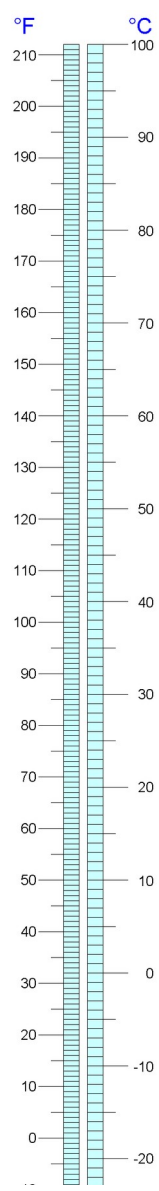


Anisotropies de températures de l'Univers primordial (étendue $\sim 10^{-4}$ K)
Expérience WMAP

- Microscopiquement, les particules d'un corps ne sont **jamais au repos** : elles ont toujours une **vitesse** et donc une **énergie cinétique**
- La température est la grandeur physique qui mesure l'**agitation thermique** d'un corps
 - Une des **7 unités fondamentales**
 - (pression : grandeur physique qui mesure les chocs des particules sur une paroi, liée à leur **quantité de mouvement**.)
- Ne peut être définie que pour des systèmes composés de nombreuses particules **en interaction** : un atome seul ou un gaz très peu dense n'ont pas de température
- Lorsque l'on met en contact deux corps de **température différente**, il y a **échange d'énergie cinétique microscopique** entre les particules plus rapides et les moins rapides, c'est-à-dire de « **chaleur** »

- **Température de l'Univers ?**
 - Température intersidérale
 - (Température SSI : $-120 / +150^{\circ}\text{C}$)
- **Définition : température que prendrait un objet en équilibre thermique**
 - Rayonnement thermique émis = rayonnement reçu
 - → fond diffus cosmologique (CMB : cosmic microwave background)

Les échelles de température



Échelle de Fahrenheit (1714) :

- Mélange glace - chlorure d'ammonium (Tp la plus basse de l'époque) : « 0°F »
- Température du corps humaine $\approx 100^\circ\text{F}$
- Solidification et ébullition de l'eau : 32°F et 212°F (180°F entre les deux)
- Echelle encore utilisée aux États-Unis, au Belize, aux îles Caïmans et au Liberia

• Échelle de Celsius (1742) :

- 0°C pour l'équilibre eau-glace, 100°C pour l'équilibre eau-vapeur

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{T(^{\circ}\text{F}) - 32}{1,8}$$

$$-40^{\circ}\text{C} = -40^{\circ}\text{F}$$

• Température thermodynamique (« absolue »)

- Même graduation que l'échelle Celsius, 0 K = -273,15°C (« zéro absolu »)
- Zéro absolu impossible à atteindre, comme c

$$T(^{\circ}\text{C}) = (T(^{\circ}\text{F}) + 40) / 1,8 - 40$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = (T(^{\circ}\text{C}) + 40) \times 1,8 - 40$$

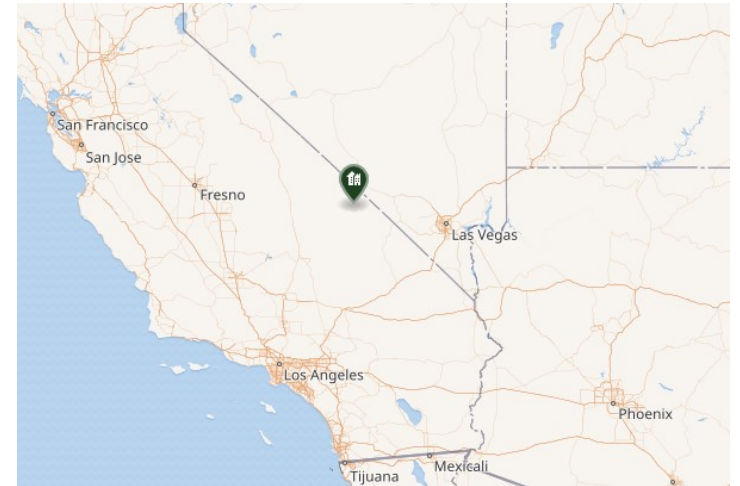
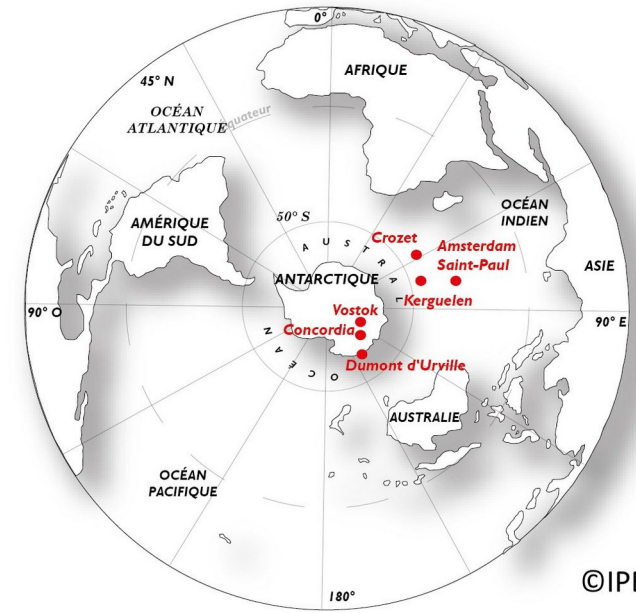
Records de température

- **Froid :**

- Sur Terre : -89,2 °C 1983 : Vostok, Antarctique
- En laboratoire : 38 pK

- **Chaud (« chaleur »...)** :

- Sur Terre : 56,7 °C en 1913 à Furnace Creek, États-Unis (24 habitants en 2010)
 - Record de température du sol : > 90°C
- En laboratoire : $\sim 7 \times 10^{12}$ K
- Dans l'Univers : Température de Planck : $1,4 \times 10^{32}$ K (au « temps de Planck », soit $\sim 10^{-43}$ s après le Big Bang)

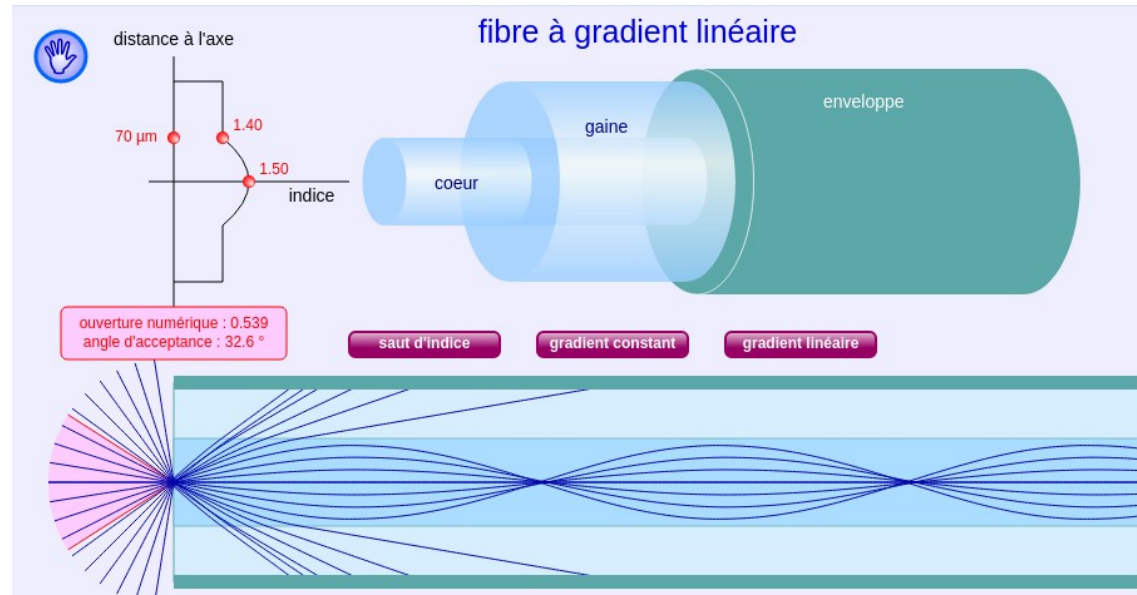


Définitions

- Une **fonction d'état** est une fonction de « **variables d'état** », qui définissent l'état d'équilibre d'un système thermodynamique
 - Variables **extensives** = volume (V), nombre de moles (n), dépendantes de la taille du système
 - Variables **intensives** = température (T), pression (p), indépendantes de la taille du système
 - Elle **ne dépend que de l'état d'équilibre** dans lequel se trouve le système
 - **Indépendante du chemin emprunté** par le système pour arriver à cet état
 - Corrolaire : la **variation d'une fonction d'état** lors d'une transformation **ne dépend pas du chemin suivi** (seulement des états initial et final)
- **Énergie** (Larousse) : Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction – s'exprime en joules
- Via le latin *energia*, du grec ἐνέργεια / enérgeia, « force en action », par opposition à δύναμις / dýnamis « force en puissance »

Les principes

- « **Principe** » : ce qui est généralement observé, avant qu'une loi ne vienne le confirmer, l'infirmier ou le modifier
 - Ex : **principe de Fermat** sur le trajet de la lumière (1657)
« [...] la nature agit toujours par les moyens les plus aisés, c'est-à-dire ou par les lignes les plus courtes, lorsqu'elles n'emportent pas plus de temps, ou en tout cas par le temps le plus court, afin d'acourcir son travail et de venir plus tôt à bout de son opération »
- = loi physique **apparente** qu'aucune expérience n'a invalidée bien qu'elle n'ait pas été démontrée
 - ~ postulat en mathématiques (et en physique quantique)



Le premier principe

« Au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son énergie interne est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, par transfert thermique (chaleur) et transfert mécanique (travail). »

- On peut définir une fonction U nommée « **énergie interne** » ayant les propriétés suivantes :

- U est une **fonction d'état**

$$dU = dE_c + dE_p = \delta W + \delta Q$$

- U est **extensive**

Noter la différence entre « d » et « δ »

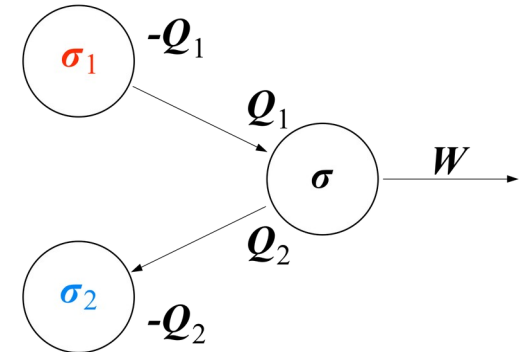
- U **se conserve dans un système isolé**

Le deuxième principe

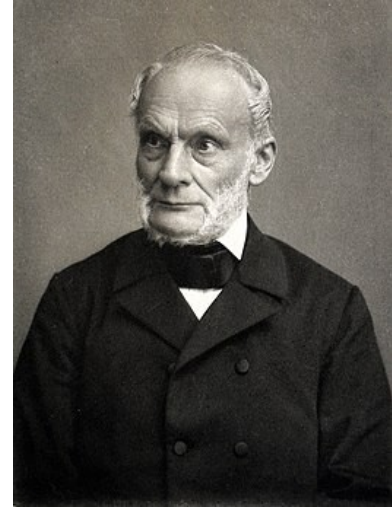


(1796-1832)

- En 1824, Sadi Carnot (oncle du président Sadi Carnot) publie « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* »
 - Réflexion sur les pertes d'énergie dans les machines à vapeur
- Expose les principes derrière les centrales énergétiques et les moteurs
 - Idée fondamentale : lorsqu'existe une **différence de température**, existe la possibilité d'engendrer de la **puissance motrice**
 - Corollaire fondamental : il est **impossible de produire de la puissance motrice à partir d'une seule source de chaleur**



Deuxième principe et entropie



- ~40 ans plus tard, Rudolf Clausius complète l'énoncé du 2^{ème} principe et crée la notion d'**entropie** : Il existe une **fonction d'état extensive S** (« entropie ») telle que

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = dS_{\text{échangée}} + dS_{\text{créée}} \quad \text{avec} \quad dS_{\text{créée}} \geq 0$$

- Interprétation : **l'entropie mesure le « désordre » d'un système**
- Autre formulation :
 - « Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec **augmentation de l'entropie globale** (du système et du milieu extérieur). On dit alors qu'il y a **création d'entropie**. »
 - L'entropie d'un système **peut diminuer** mais cela signifie que **l'entropie du milieu extérieur augmente de façon plus importante**, le bilan entropique global étant positif (ou nul si la transformation est réversible)

Discussion physique

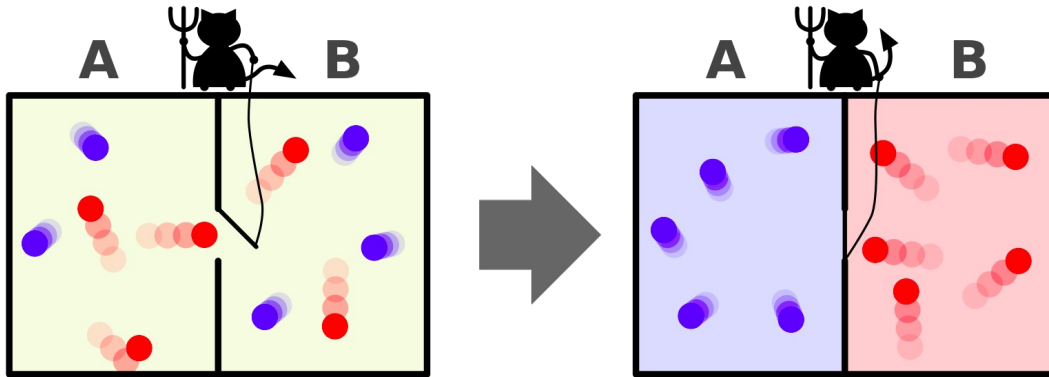
- **Un système évolue spontanément vers un état d'équilibre thermique homogène**
- → Le système devient indifférent à ce qui l'entoure, il a atteint un **désordre maximal**
- Conséquence : un système **plus homogène** a une **entropie plus grande**



- Le **déterminisme** régissant l'univers comme un **système isolé** semble celui d'une loi de **désorganisation progressive**
 - L'expansion de l'Univers (Hubble 1924) est un processus de dissipation énergétique
 - Perte / dissipation irréversible d'énergie → « mort thermique de l'univers »

L'expérience du démon de Maxwell

- Expérience de pensée publiée en 1871, qui serait en **désaccord avec le deuxième principe**

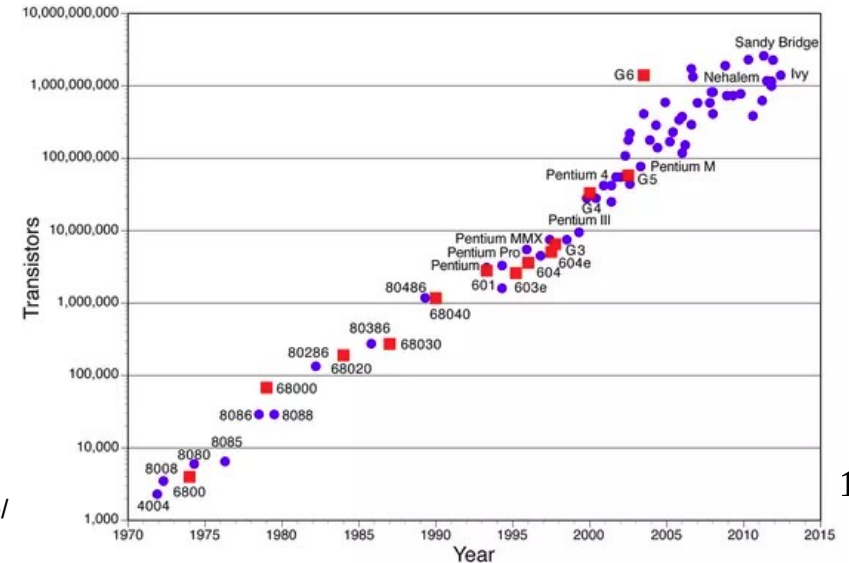
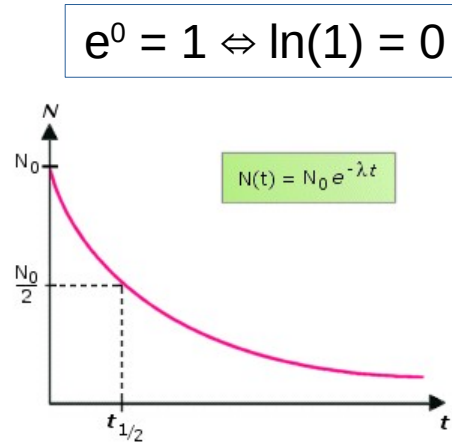
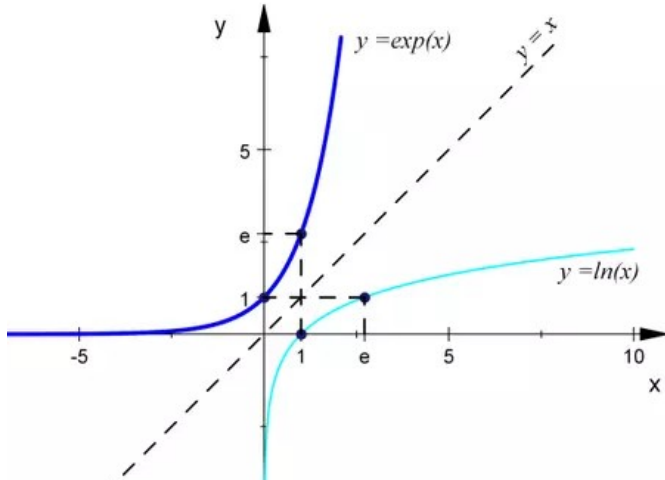


- Boîte avec **2 compartiments séparés par une trappe**, qu'un « démon » peut ouvrir **sans dépense d'énergie** quand une particule « intéressante » s'en approche
- État final : particules plus rapides à droite et plus lentes à gauche :
 - → B est plus chaud que A
 - **Le flux de chaleur remonte le gradient de température !**
 - = **baisse de l'entropie !**

Fonctions exponentielle et logarithme

Ce sont des fonctions « réciproques » (symétriques par rapport à la droite $y=x$)

- Croît très rapidement
 - « Transforme la somme en produit »
 - Phénomènes explosifs
- Exponentielle décroissante : réactions chimiques, radioactivité, électricité, ...
- Croît très lentement
 - « Transforme le produit en somme »
- Échelle logarithmique : représente plusieurs ordres de grandeur
 - Échelle de Richter, décibels, pH, loi de Moore, ...



Le troisième principe



W. Nernst.

- **Principe de Nernst (1906)**

- « La valeur de l'entropie de tout corps pur dans l'état de **crystal parfait est nulle à la température de 0 kelvin** »

$$S = k_B \cdot \ln(\Omega)$$

- $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ (ou $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) : **constante de Boltzmann**
 - Rappel de la première émission : définition du Kelvin
- Ω : **nombre d'états possibles** du système
 - Lorsque le système ne peut prendre qu'un **seul état à température nulle**,
 $S = k_B \cdot \ln(1) = 0$

Entropie et information 1



Claude Shannon (1916-2001)

- Exemple : 5 lettres : 26^5 mots, 10 lettres : $26^{10} = (26^5)^2$ mots
 - soit le **carré** (12 millions / 140 000 milliards) alors que le mot n'est que **2 fois plus long** donc seulement **2 fois plus d'information** → **logarithme**
- Pour n lettres prises dans un alphabet de s signes, Hartley (1928) définit la **quantité d'information** comme

$$H = n \log s$$

- En théorie de l'information, **l'information est l'opposée du logarithme de la probabilité** : $I = -\log p$

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 p_i$$

p_i : probabilité de prendre l'état i

- **Entropie de Shannon : quantité d'information délivrée par une source (« originalité »)**

$$S = k_B \ln (\Omega)$$

Définition d'une information \approx celle d'une « néguentropie »

Entropie et information 2

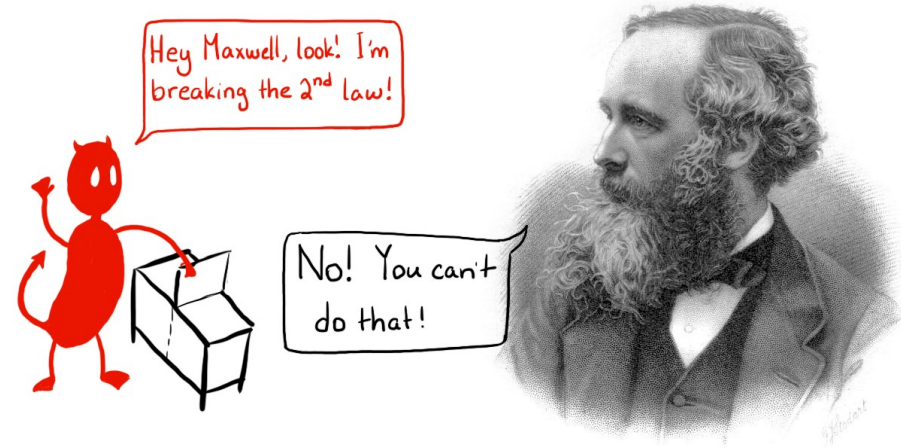
« **Entropie, manque d'information, incertitude, désordre, complexité**, apparaissent donc comme des avatars d'un seul et même concept. Sous l'une ou l'autre de ces formes, l'entropie est associée à la notion de probabilité [...] Elle caractérise non pas un objet en soi, mais **la connaissance que nous en avons et nos possibilités de faire des prévisions**. Elle a donc un caractère à la fois objectif et subjectif. »

Roger Balian, Université de tous les savoirs, p220, cité par <https://jeanzin.fr/ecorevo/sciences/entropie.htm13>

« L'entropie correspond [...] à une **perte ou un manque d'informations** en théorie de l'information et en thermodynamique [...] **l'information est une grandeur physique** [...] Le fait que l'entropie ait tendance à augmenter au cours du temps exprime tout simplement le fait que **l'univers a tendance à perdre des informations**, ce qui est naturellement **compensé par le rôle de la conscience** qui est au contraire d'en introduire, ce qui explique que **notre univers a tendance à s'ordonner, via le phénomène de la vie**, alors qu'il devrait mécaniquement tendre vers le désordre. »

Entropie et information 3

- La quantité d'information que représente les caractéristiques de la particule est minimale
- Mais, au niveau microscopique, ($\sim 10^{23}$ fois plus de molécules – nombre d'Avogadro), l'information ainsi utilisée par le démon de Maxwell **est importante**



- Solution à l'expérience du démon de Maxwell (préservant le deuxième principe) :
 - 1949, Léon Brillouin met l'accent sur la nécessité pour le démon d'**acquérir de l'information**, et que cette acquisition **augmente l'entropie du système**
 - 1961, Rolf Landauer met en évidence l'importance de la **mémorisation de l'information** et surtout de la **nécessité d'effacer cette mémoire**, qui a un **coût entropique**
- Le deuxième principe n'est pas mis en défaut !

La néguentropie

- Ou « entropie négative » (« negative entropy ») : **baisse du degré de désorganisation d'un système** – correspond à une organisation **des systèmes vivants** qui s'oppose à l'entropie
- Terme introduit en 1944 par Schrödinger dans son ouvrage *Qu'est-ce que la vie ?* Il voulait expliquer l' « ordre » à l'intérieur des êtres vivants (« thermodynamique du vivant »)
- Bernard Stiegler : « La définition du vivant la plus dépouillée [...] nous vient de Schrödinger : **le vivant, c'est ce qui lutte contre l'entropie** – qu'on peut définir comme "la dissipation d'énergie". Le vivant retient l'énergie, jusqu'à ce qu'il ne puisse plus le faire, et alors il meurt. Donc, le vivant produit de la néguentropie, qui est la capacité à différer la dispersion de l'énergie. »
- Le second principe indique que l'entropie croît spontanément pour un système isolé : la notion de néguentropie est donc **limitée dans le temps ou l'espace** et ne peut s'appliquer qu'à un **système ouvert**
- On parle également de « **syntropie** », par exemple pour l'agriculture qui se base sur le fonctionnement des **écosystèmes naturels**



Exemple de la cellule



Cellule animale
(Russell Kightley)

En termes d'énergie

Pour conserver sa néguentropie (**organisation & fonctionnement** – « **autopoïèse** » ou « **agence** » du « **holon** » selon Ken Wilber), la cellule doit **consommer de l'énergie** fournie par son environnement extérieur.
(« **communion** » du holon)

Lorsqu'elle meurt, elle n'entretient plus cette néguentropie, donc elle se désagrège.
(« **autodissolution** » du holon)

En termes d'information

Ce qui rend possible le maintien d'une structure « ordonnée », ce sont les **voies de communication sélectives** entre l'**intérieur de la cellule** et son **environnement changeant**

Les membranes des cellules sont **sélectivement poreuses** ; la perte de cette capacité entraîne une **mort rapide**, notamment sous l'effet de toxines dont elle **ne peut plus se protéger**

L'énergie libre

- Ou « énergie de Helmholtz »

$$F = U - TS$$

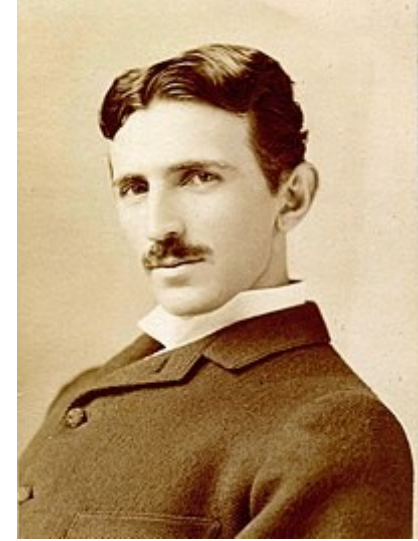
- Premier et deuxième principes : une transformation réelle à T et V constants ne peut s'effectuer qu'avec une **diminution de l'énergie libre** du système
 - « **Moins d'énergie et/ou plus d'entropie** »
 - (À T et p constantes → G = « **enthalpie libre** »)
- Condition d'évolution spontanée d'un système à température et volume constants : $dF \leq 0$



Hermann von Helmholtz (1821-1894)



L'énergie « libre »



Nikola Tesla (1856-1943)

- Ou énergie « **surnuméraire** », « **surunitaire** » : énergie fournie par un dispositif en excédent de l'énergie qu'il a reçue – notion de « **surunité** » liée au **mouvement perpétuel** (« **unité** »)
- Par exemple, Nassim Hameed veut extraire de l'énergie des **fluctuations quantiques du vide** → « atteignable d'ici 20 ans »
 - « **Emprunt** » d'une fraction **infime** de l'énergie qui finit par retourner au vide
 - Lié au **contrôle de la gravité**
- Harold White, Jean-Christophe Dumas, ...

Métrique d'Alcubierre (1994) : solution des équations d'Einstein permettant théoriquement d'atteindre des **vitesse supraluminiques** par **contraction et dilatation** de deux régions de l'espace-temps propulsant la région centrale.

- Rappel : un « principe physique » est **vérifié par la pratique** mais **pas démontré par la théorie**
- Le deuxième principe interdit le **mouvement perpétuel**
 - **Dissipation de l'énergie & augmentation de l'entropie**
 - *Et donc a fortiori la surunité*

