



l'institut
d'électronique



La loi qui régit l'univers. Petite introduction au concept d'entropie

Prof. Luca VARANI
Institut d'Electronique et des Systèmes
Université de Montpellier



Un sablier : pas aussi simple qu'on le croit



passé

La flèche du temps

futur

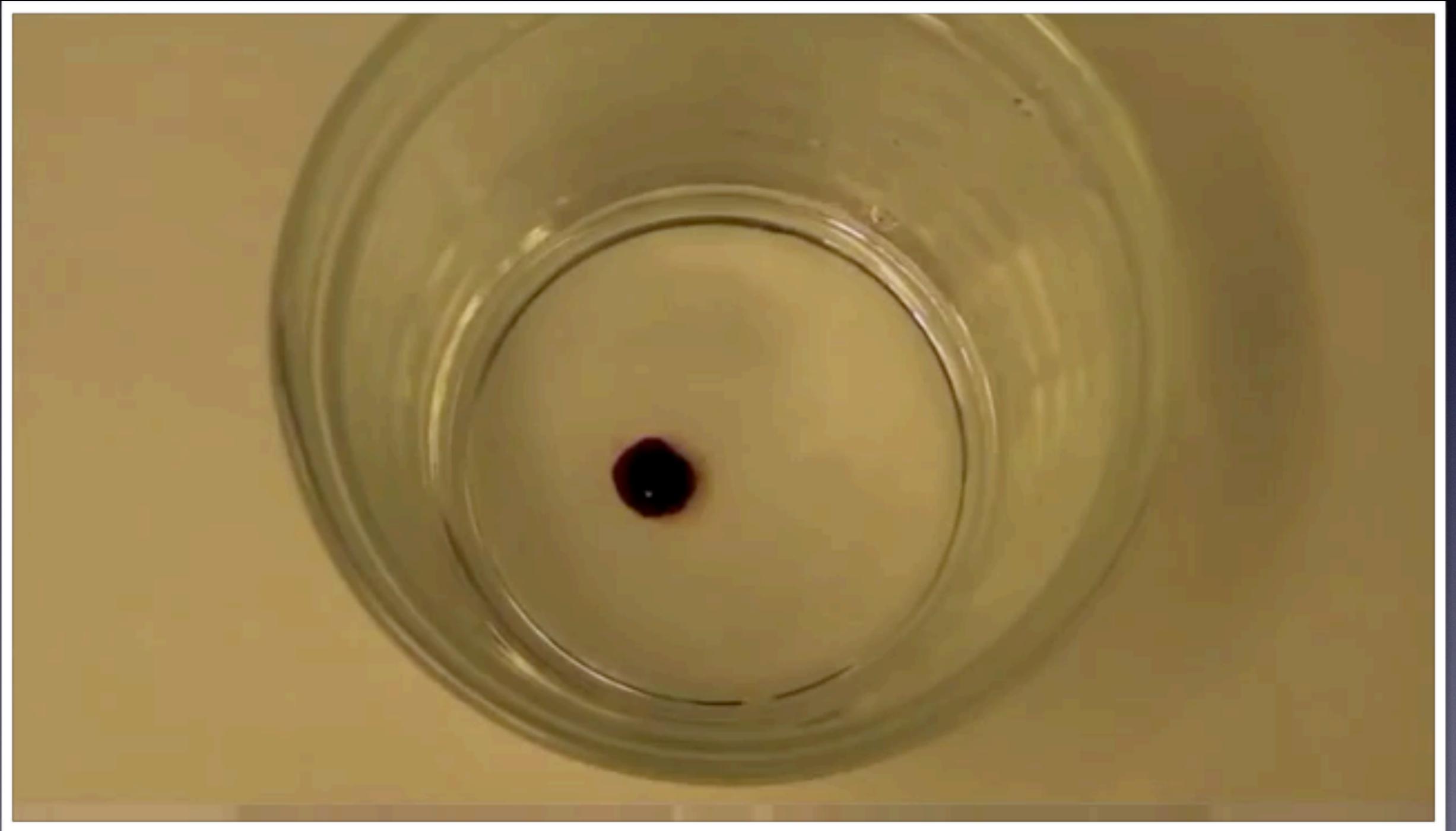
Les réactions spontanées

Elles se produisent par elles-mêmes, sans action d'agent extérieur, dans un intervalle de temps donné

Un ballon qui se dégonfle



Encre qui diffuse dans l'eau



Poêle qui refroidit



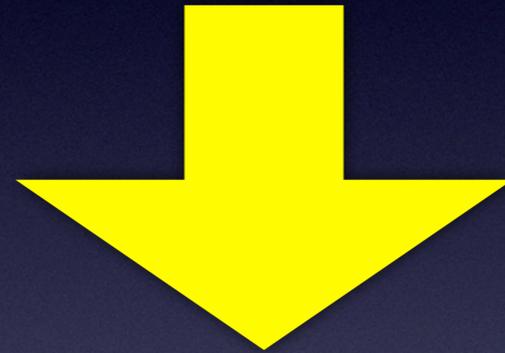
Les transformations naturelles sont par essence
irréversibles



Quelle loi ?

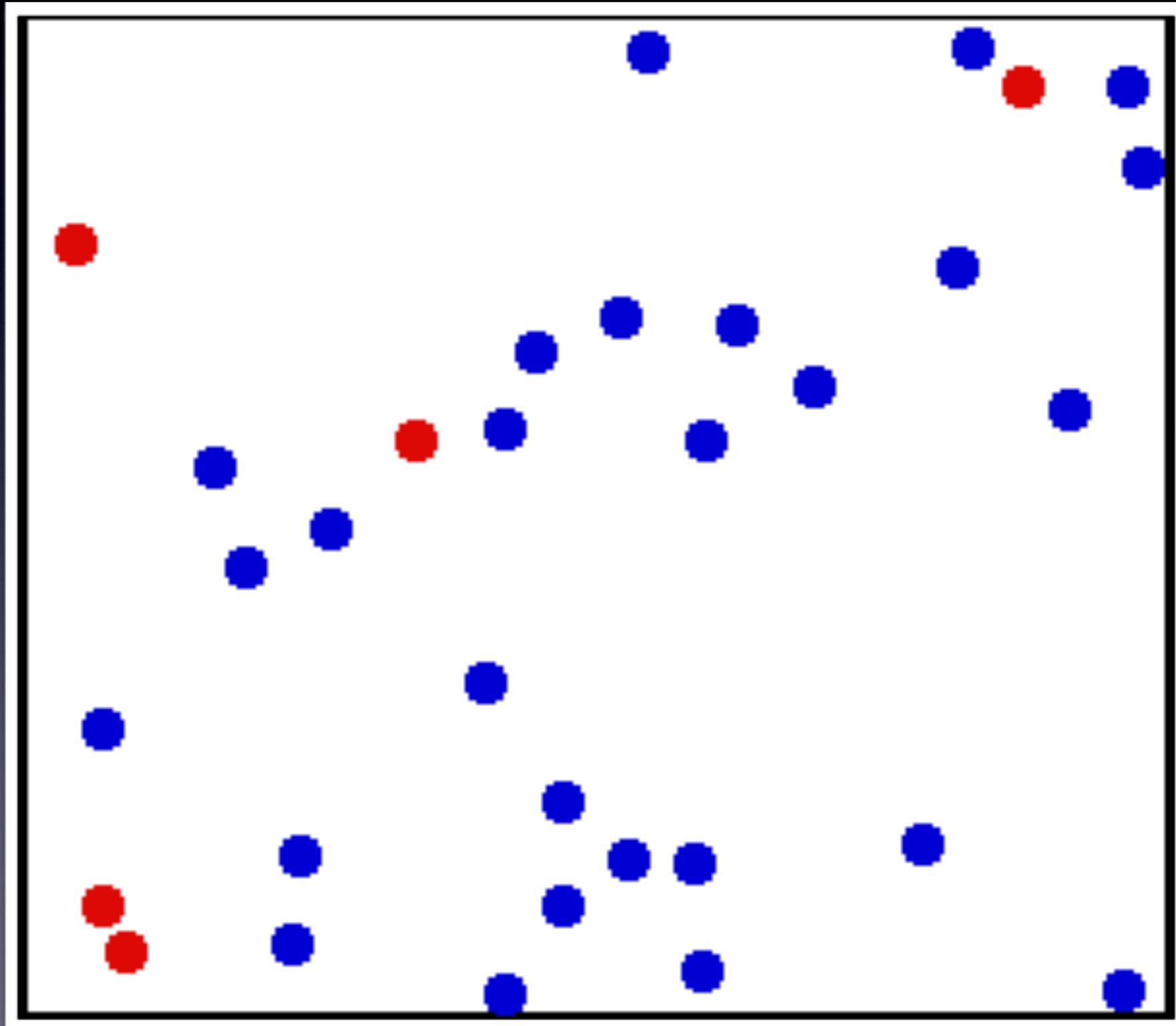
Paradoxe de l'irréversibilité

Les lois physiques restent inchangées si on change le signe de la variable temps ($t \rightarrow -t$)

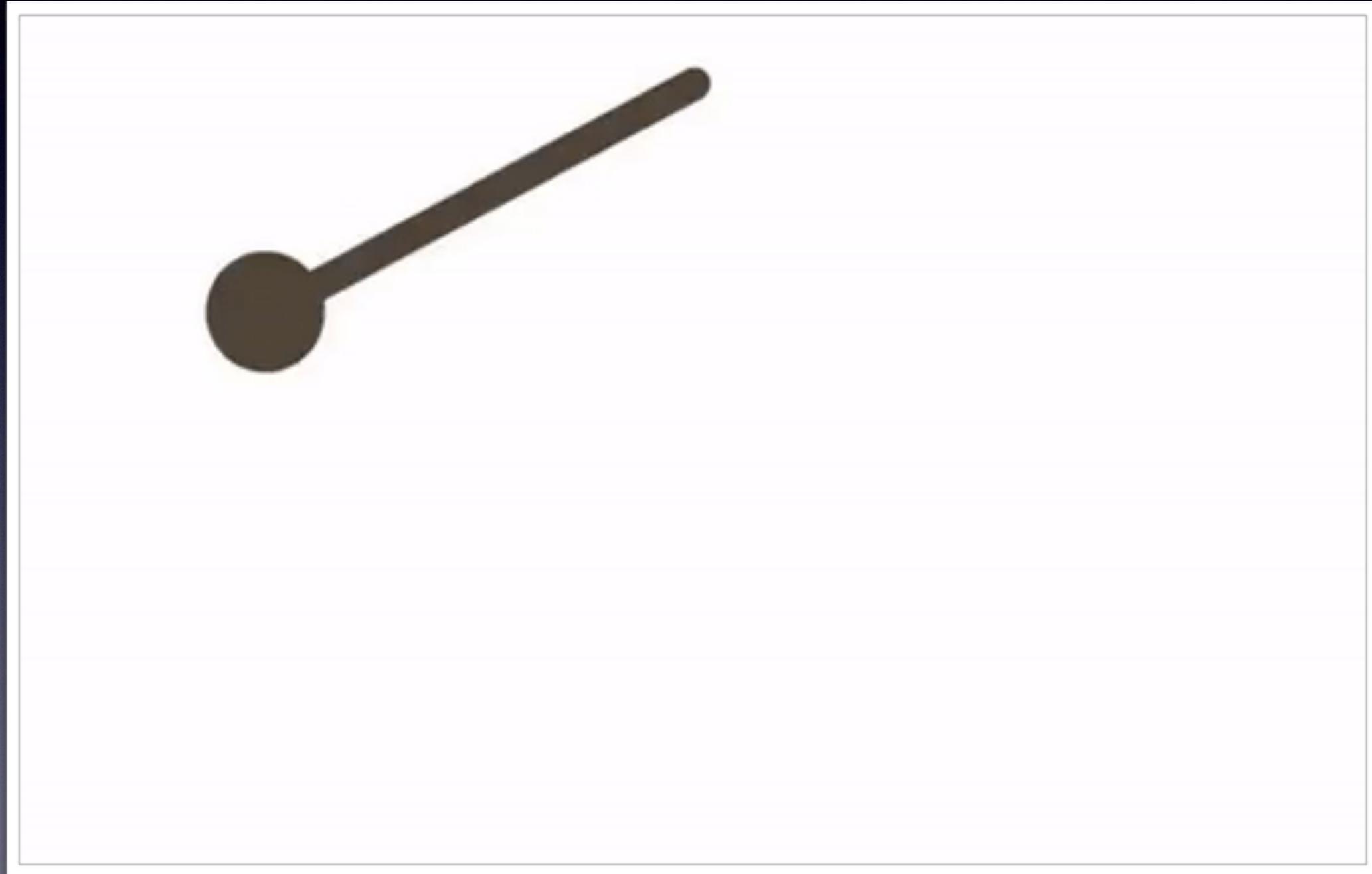


A l'échelle microscopique, on ne peut distinguer la direction du passé de celle du futur

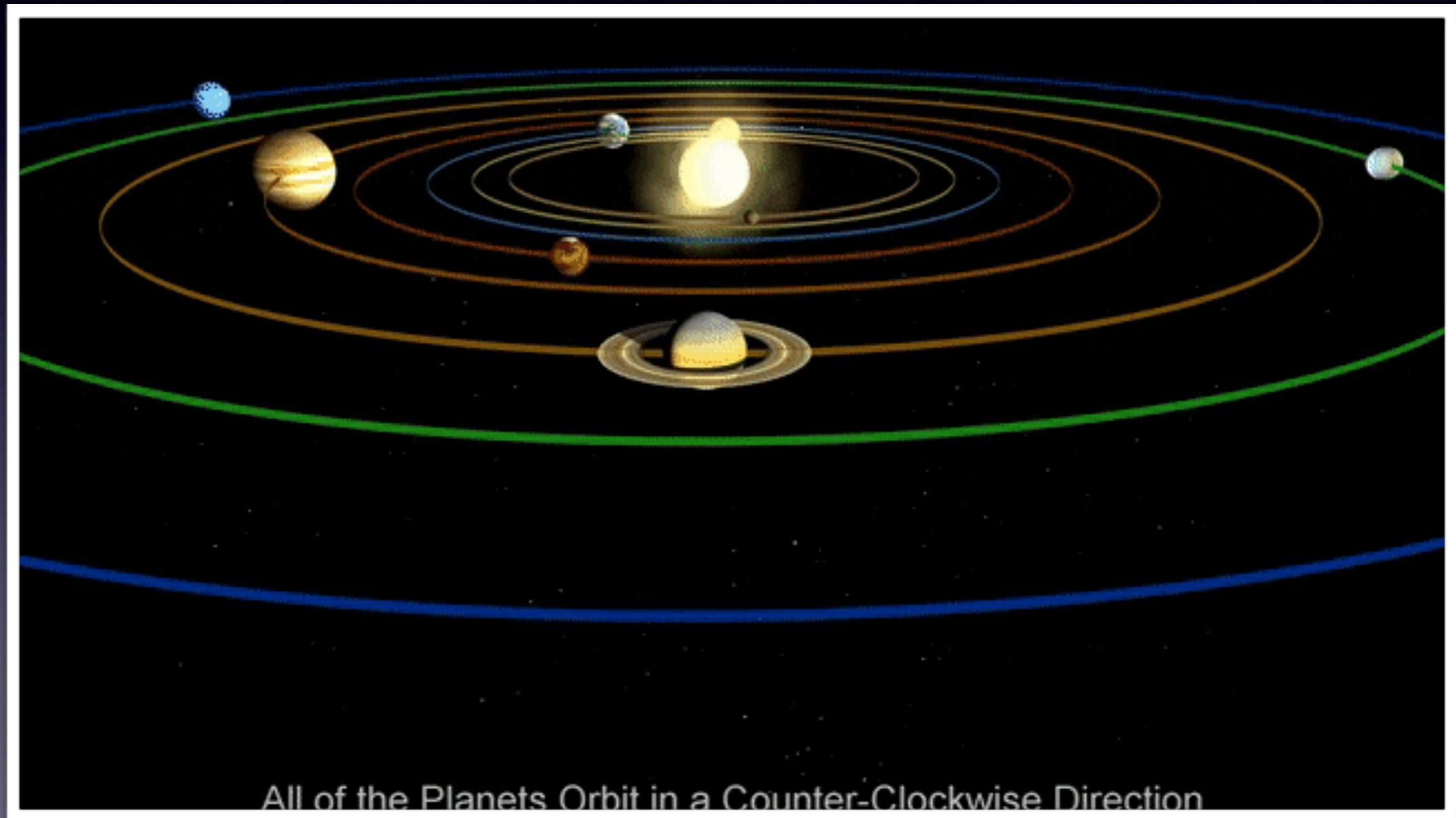
Mouvement aléatoires des atomes ou molécules



Pendule



Mouvement des planètes



Un pas en arrière

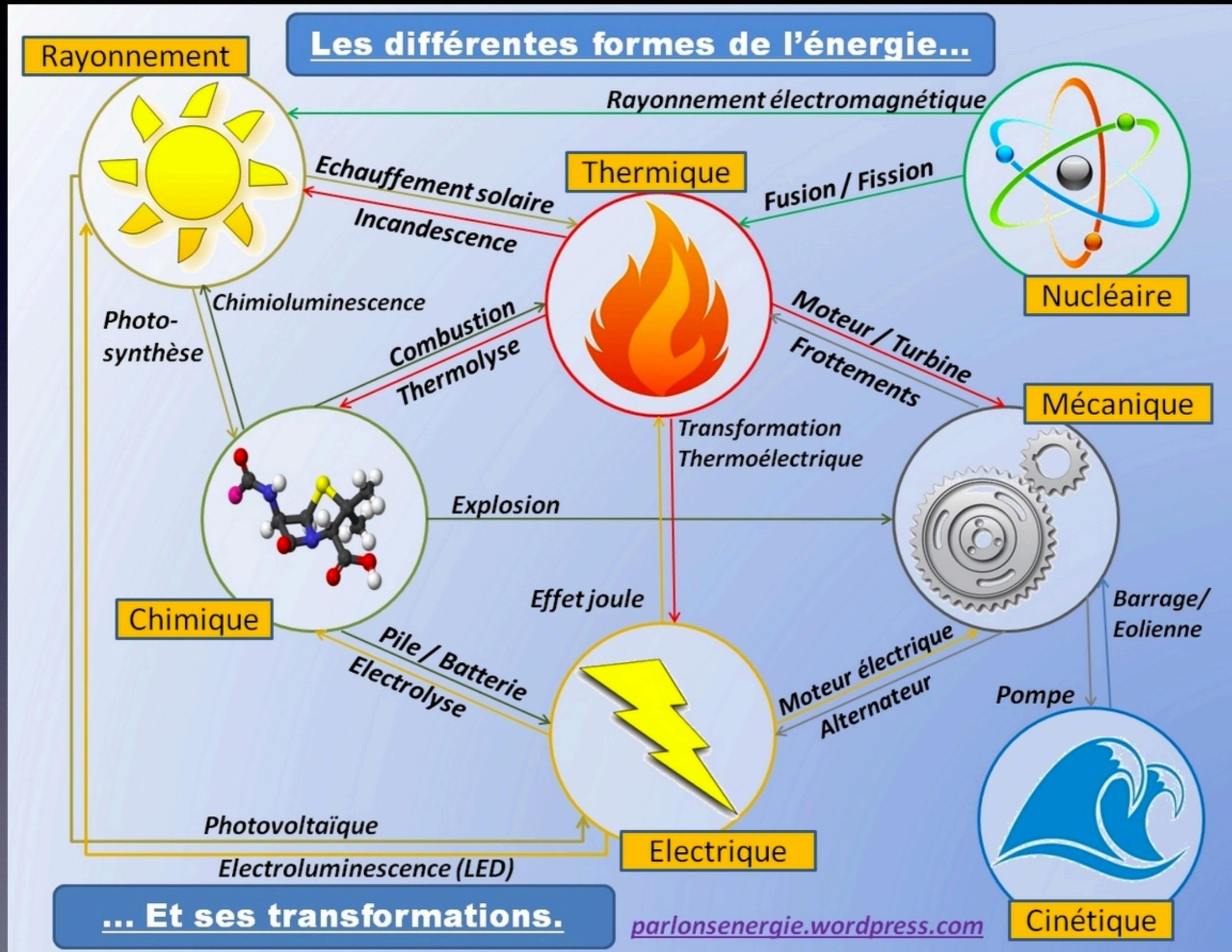
C'est quoi l'énergie ?

Energie (en physique !)

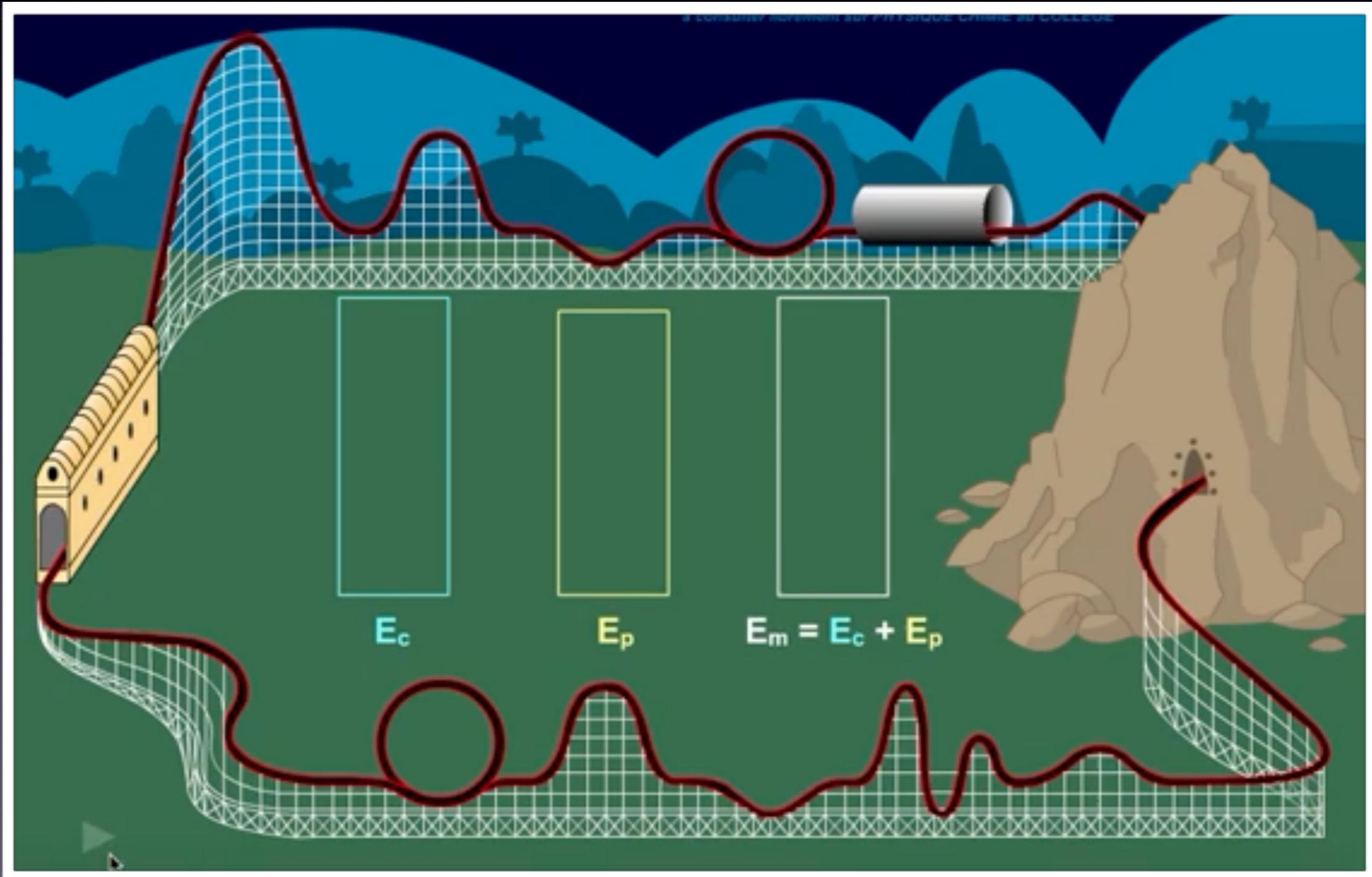
Mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur.

Dans le Système International d'unités l'énergie s'exprime en joules.

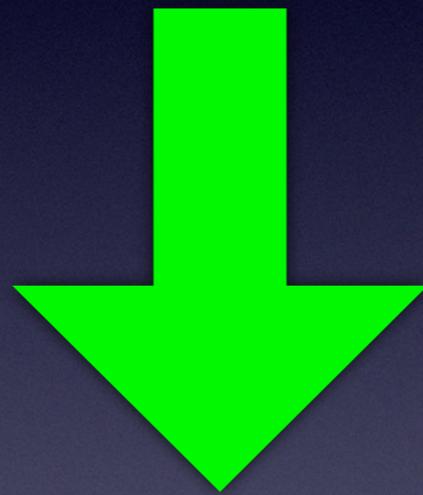
Transformations d'énergie



L'énergie se transforme mais l'énergie totale reste constante



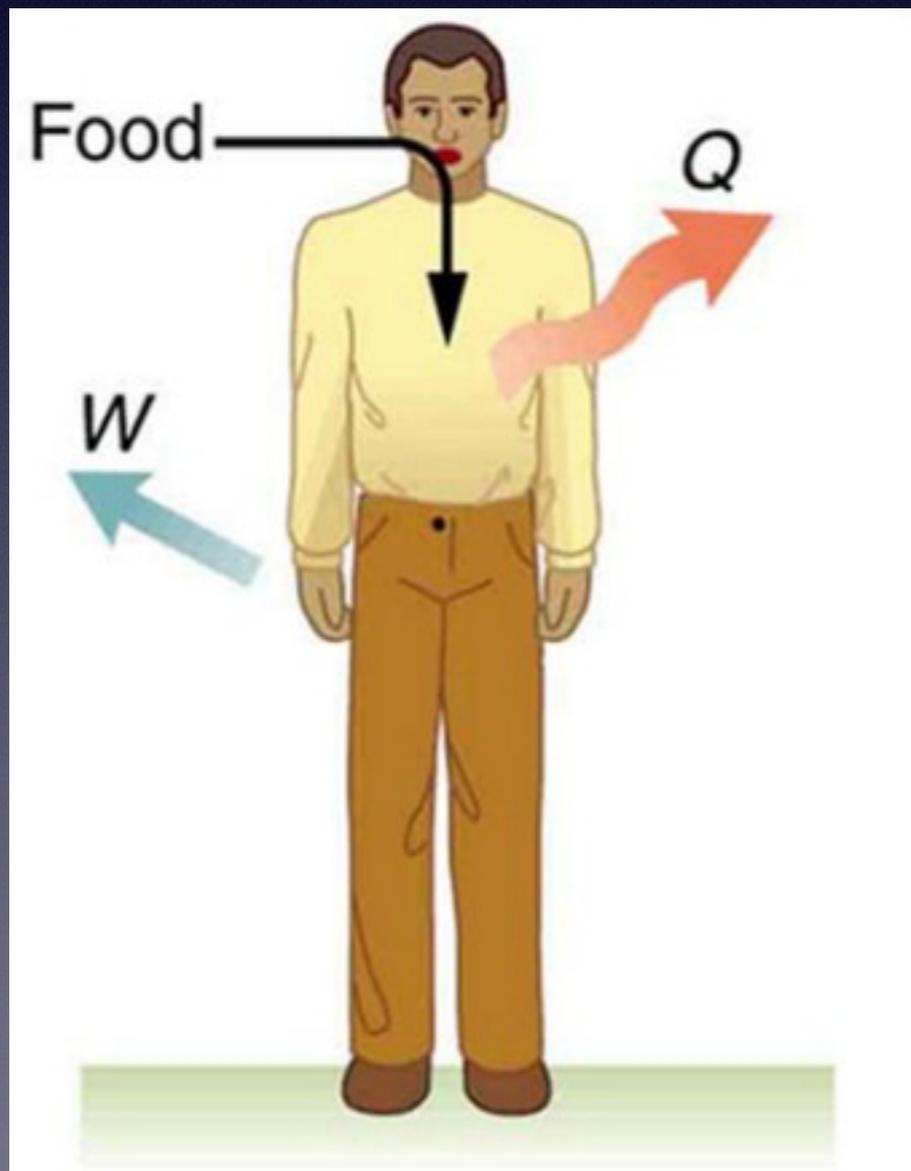
Etude de l'énergie et
de ses transformations



THERMODYNAMIQUE

1ère lois de la thermodynamique

L'énergie totale d'un système isolé se conserve



N.B. il faut compter
toutes les formes
d'énergie
y compris la chaleur

CHALEUR

Vision ancienne (calorique)

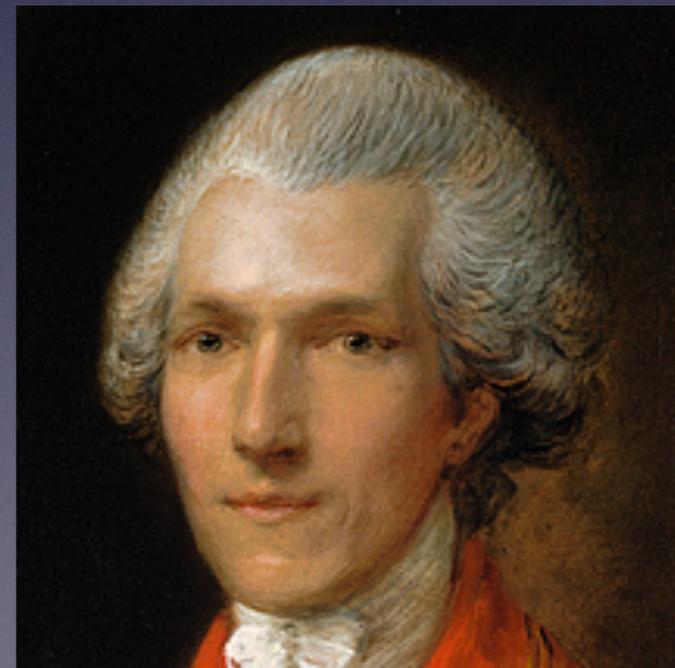
La chaleur est un fluide, le calorique, s'écoulant des corps chauds vers les corps froids.



Antoine Lavoisier (1743-1794)

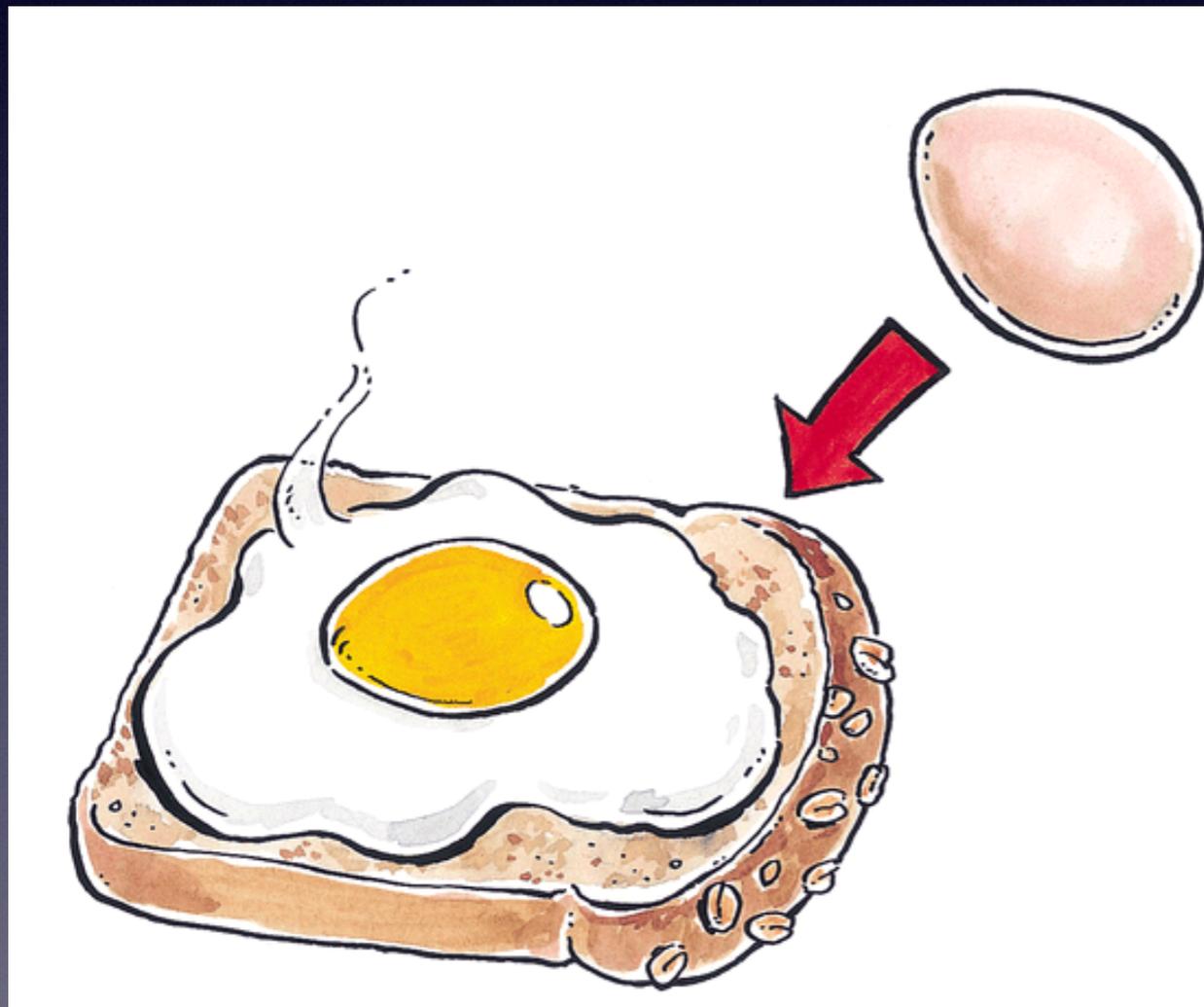
Vision moderne (cinétique)

La chaleur est due au mouvement au sein d'un matériau.
Plus il y a du mouvement plus le corps est chaud.



Benjamin Thompson (1753-1814)

L'énergie est une quantité invariable dans la nature. Elle ne peut que se transmettre d'un système à un autre. On ne crée pas l'énergie, on la transforme.

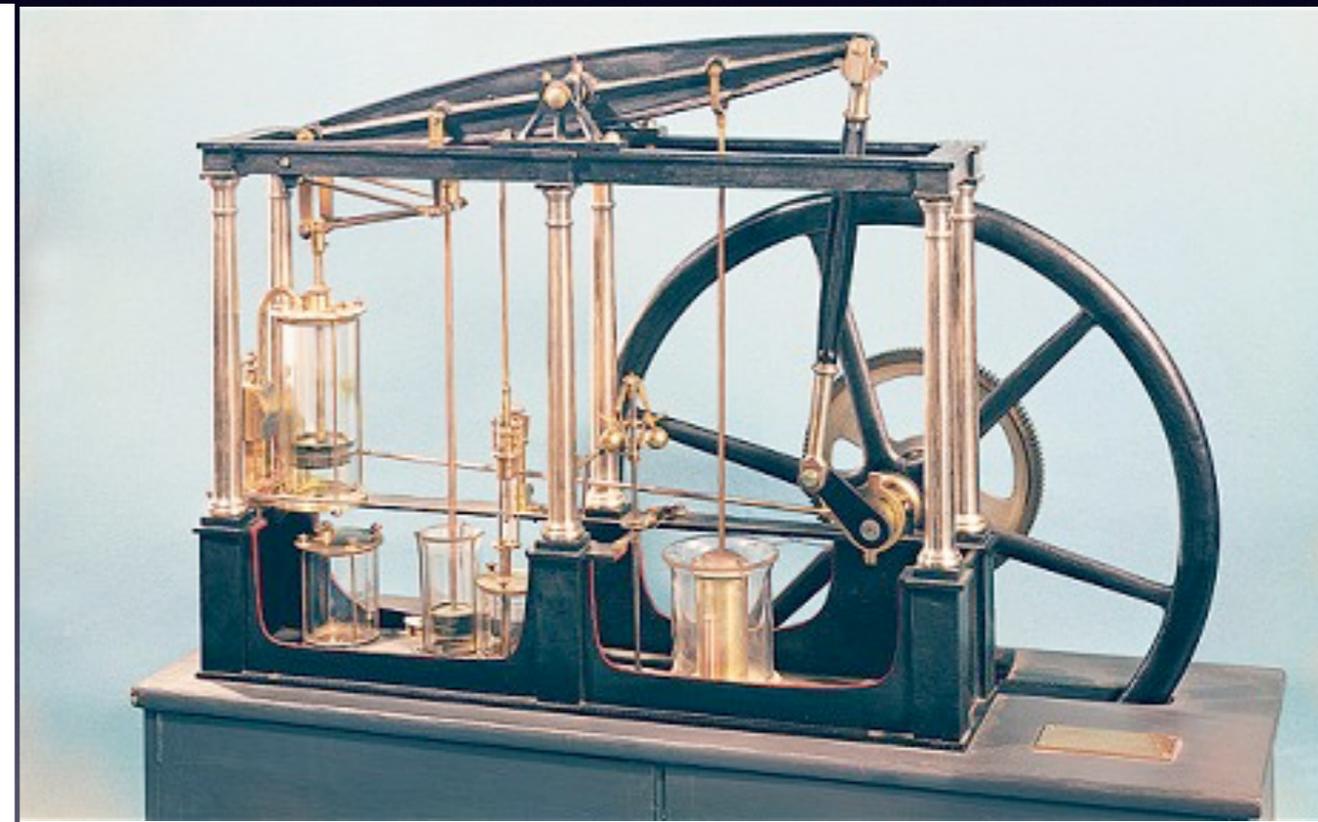
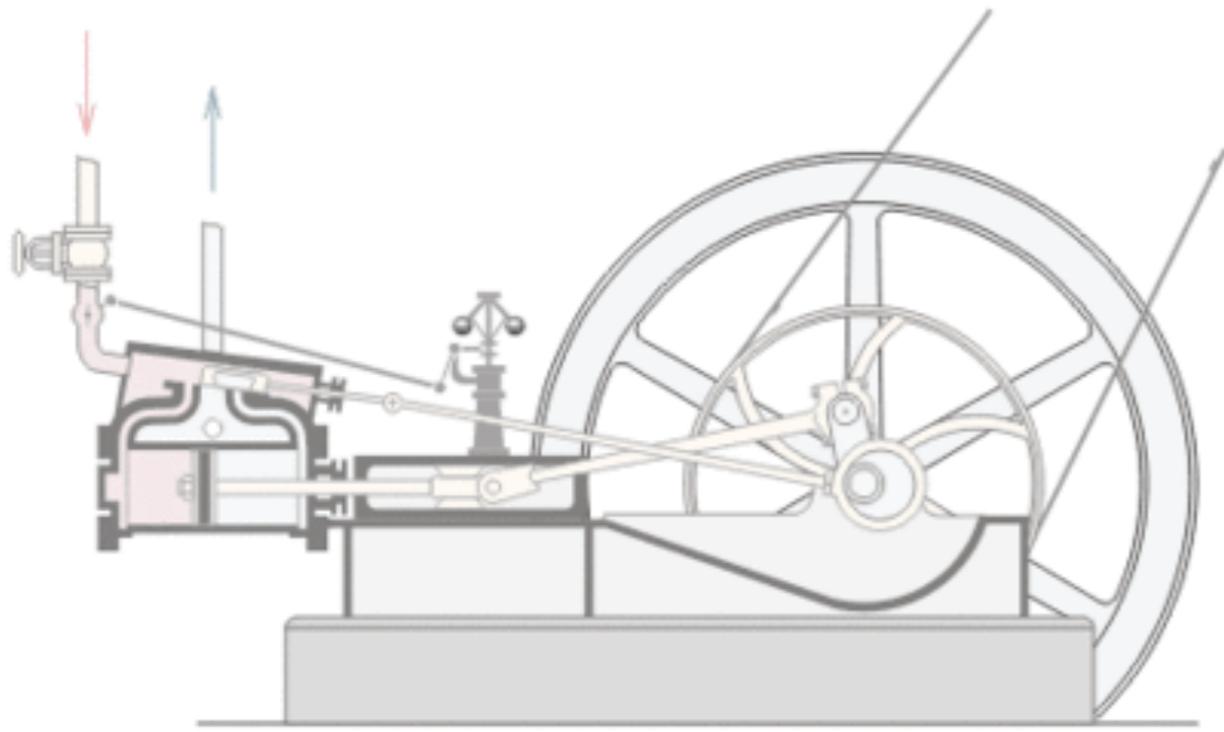


Problème
cette lois
n'explique pas la
flèche du temps !

Contexte historique

Revolution industrielle (XIX siècle en Angleterre)

- Machines à vapeur : industrie, agriculture, transports
- Eau, vents, animaux → chaleur, vapeur



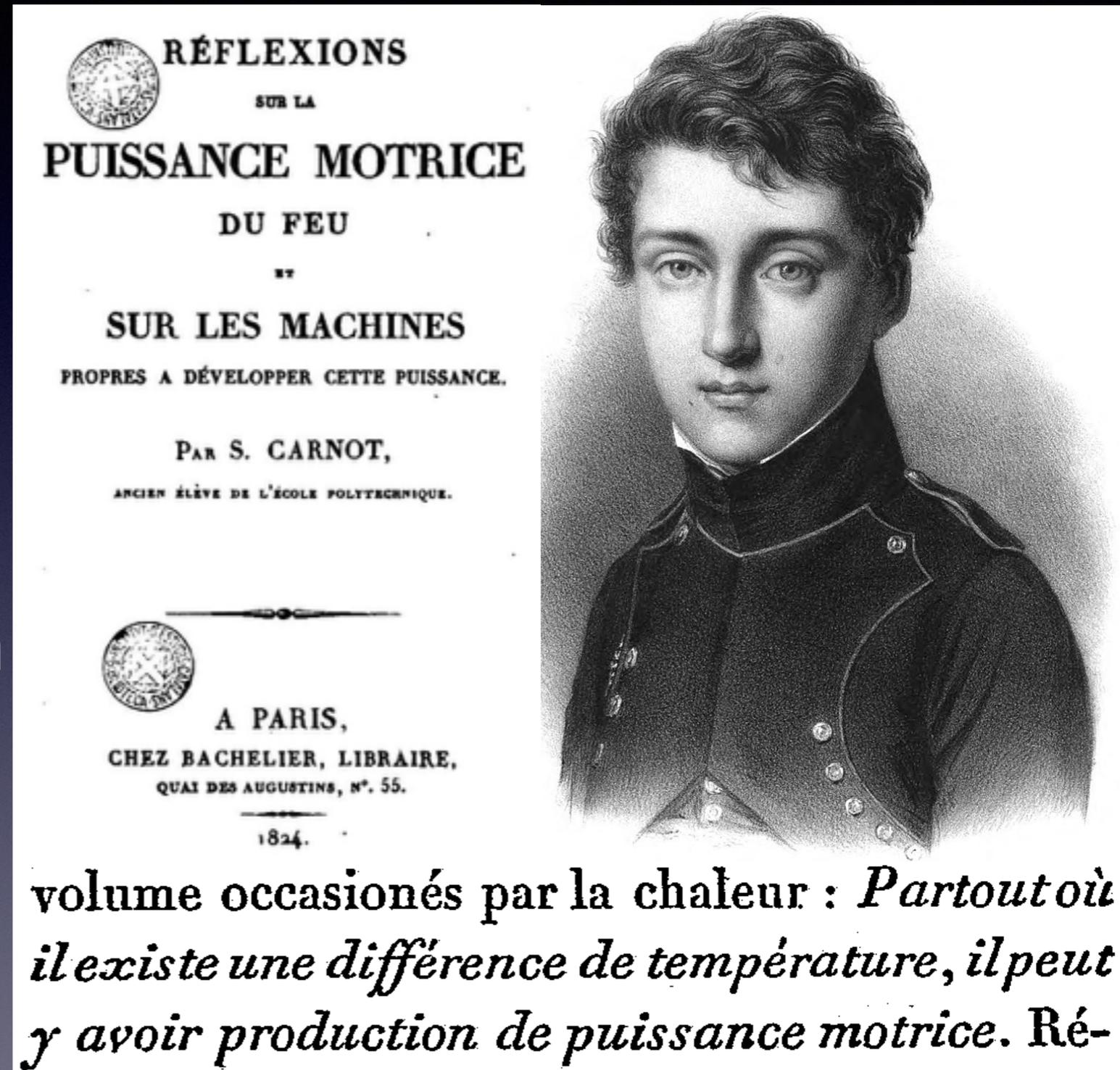
Credits School Wikipedia selection

chaleur

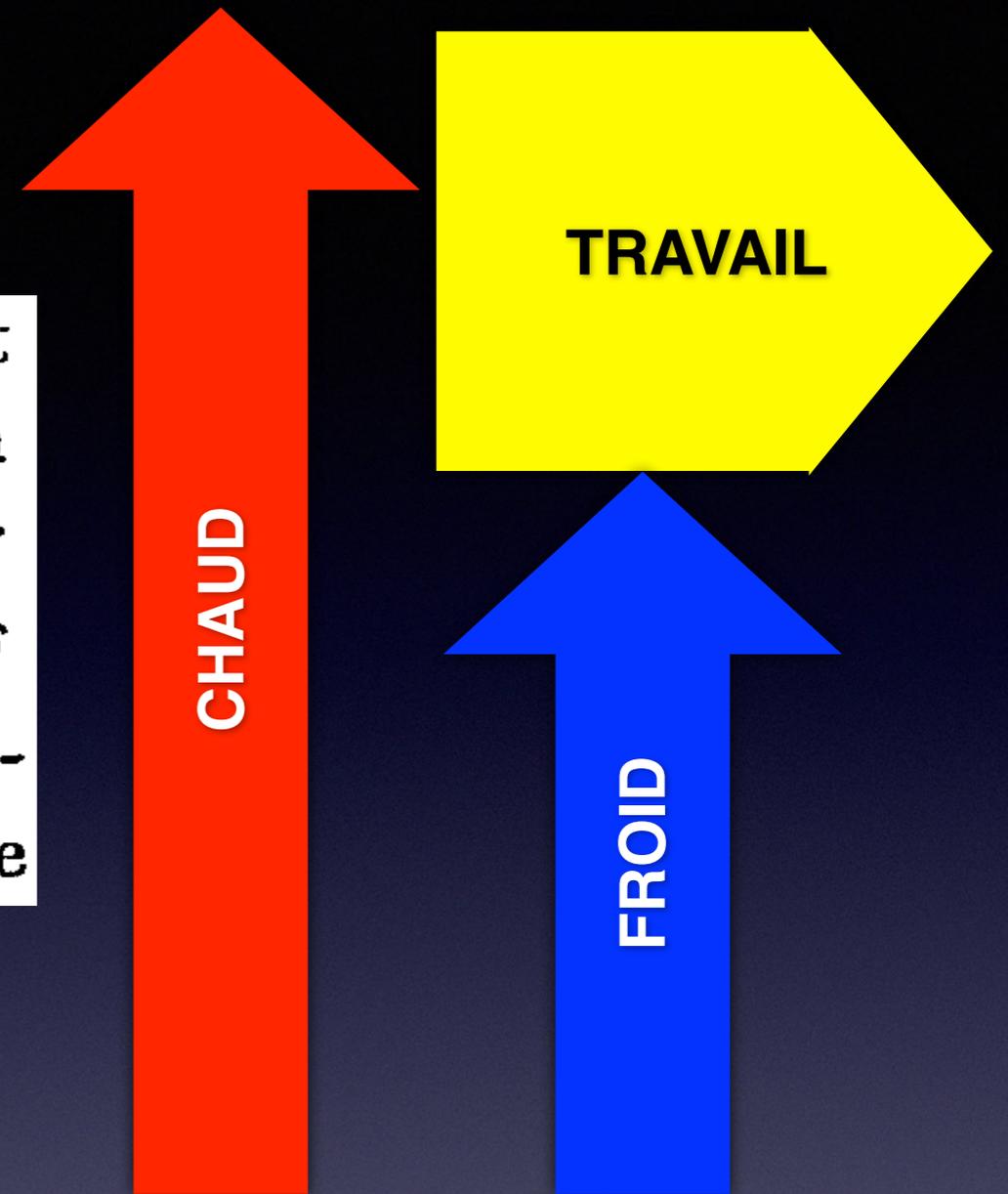
mouvement

1^{er} protagoniste : Sadi Carnot (1796-1832)

- Lazare Carnot : Ecole Polytechnique
- Gay-Lussac, Poisson, Ampère enseignants
- Ingénieur dans l'armée
- Oeuvre fondamentale en 1824
- Mort de choléra (écrits enterrés avec lui)



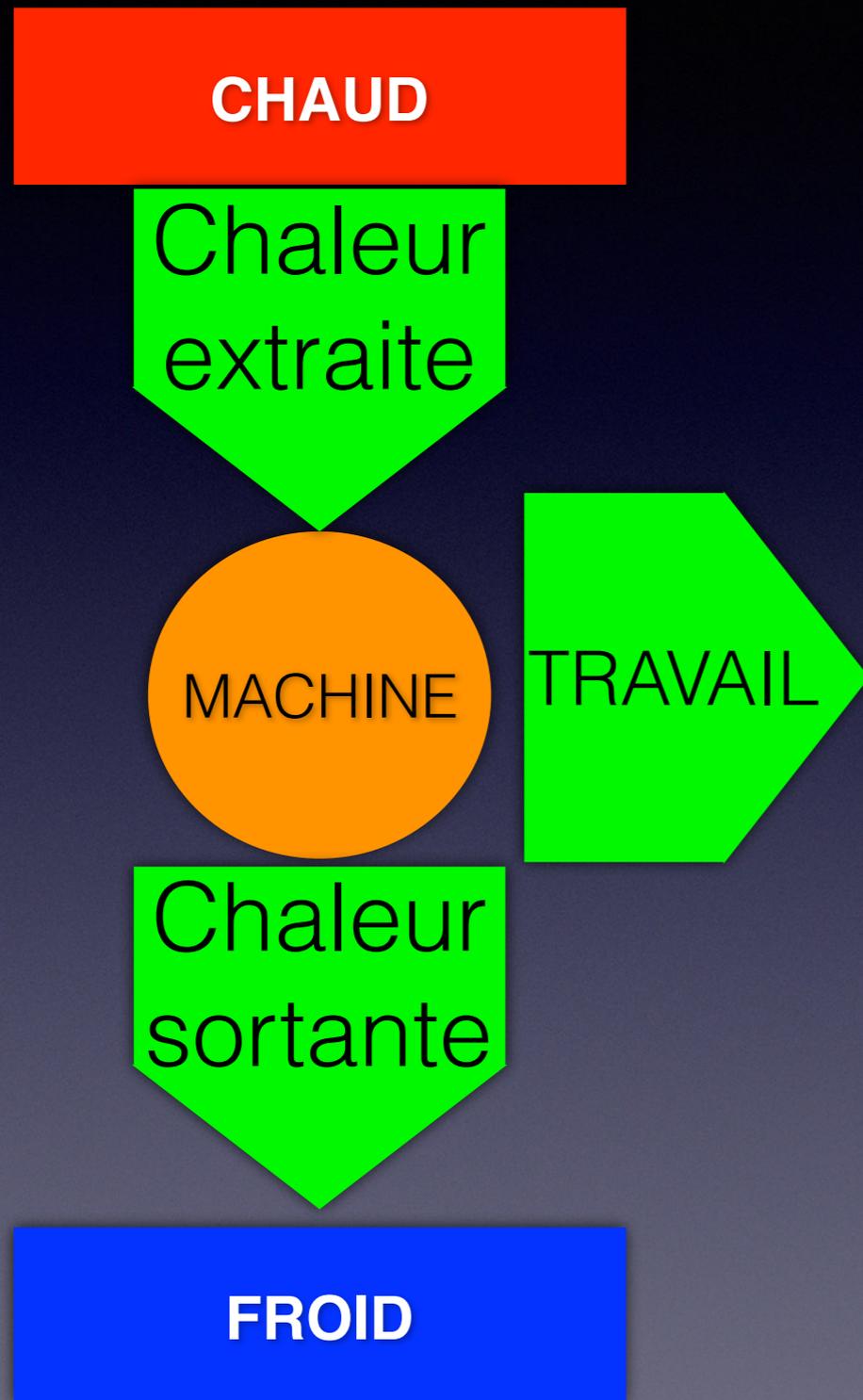
La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, *mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid*, c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rempli par quelque



Le travail maximal qu'on peut obtenir =

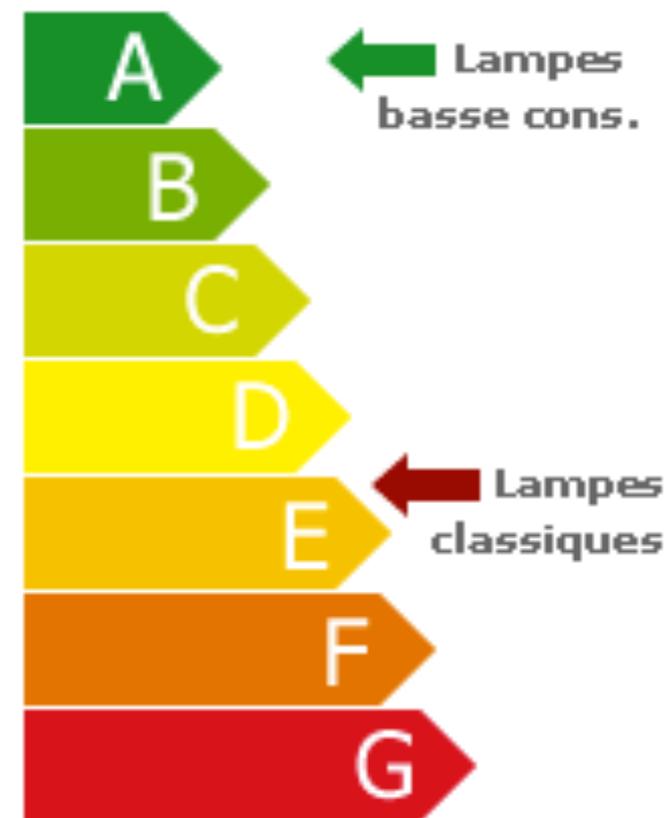
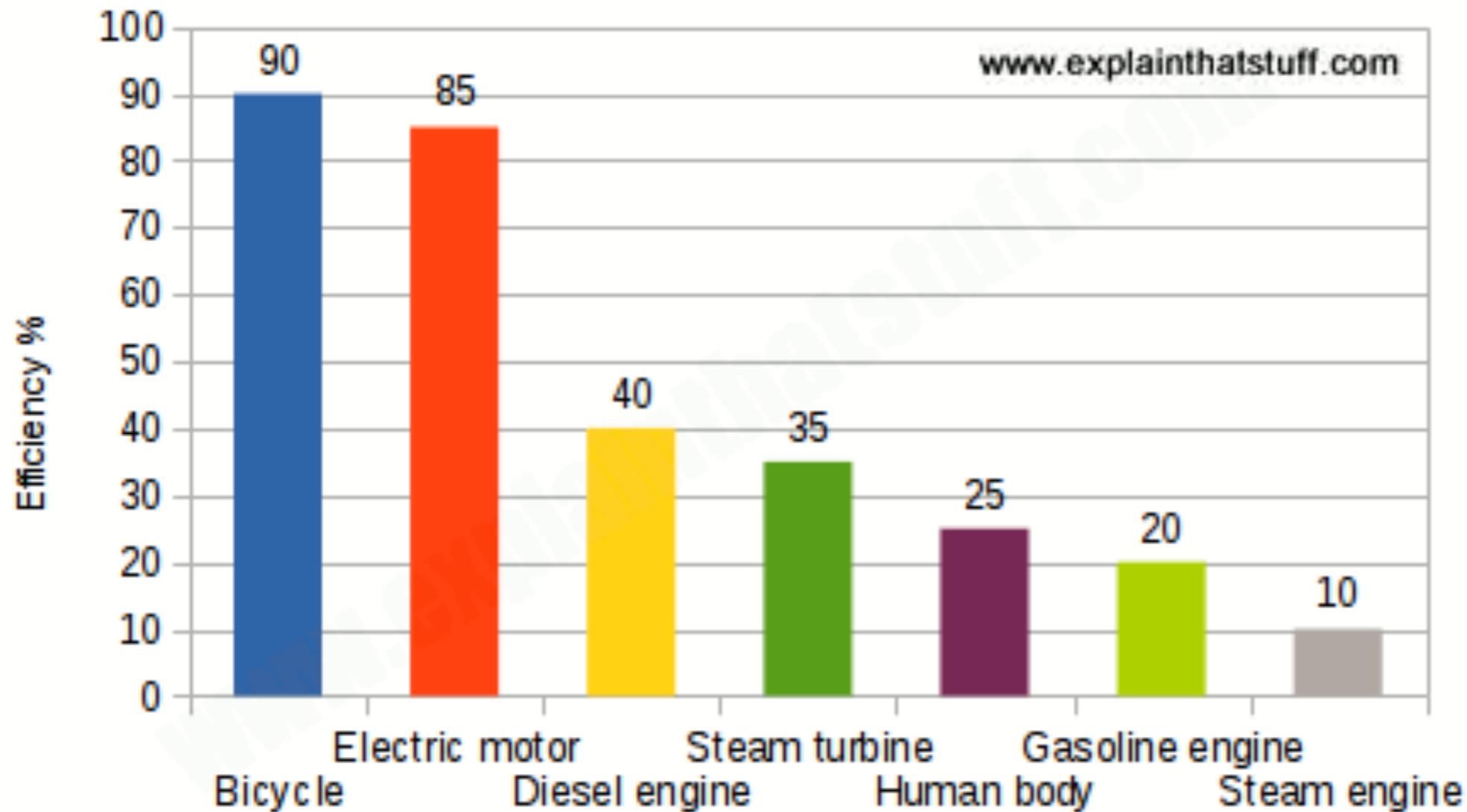
énergie extraite du corps chaud - énergie absorbée par le corps froid

Rendement de Carnot



$$\text{Rendement} = \frac{\text{Travail}}{\text{Chaleur extraite}}$$

Rendement des machines



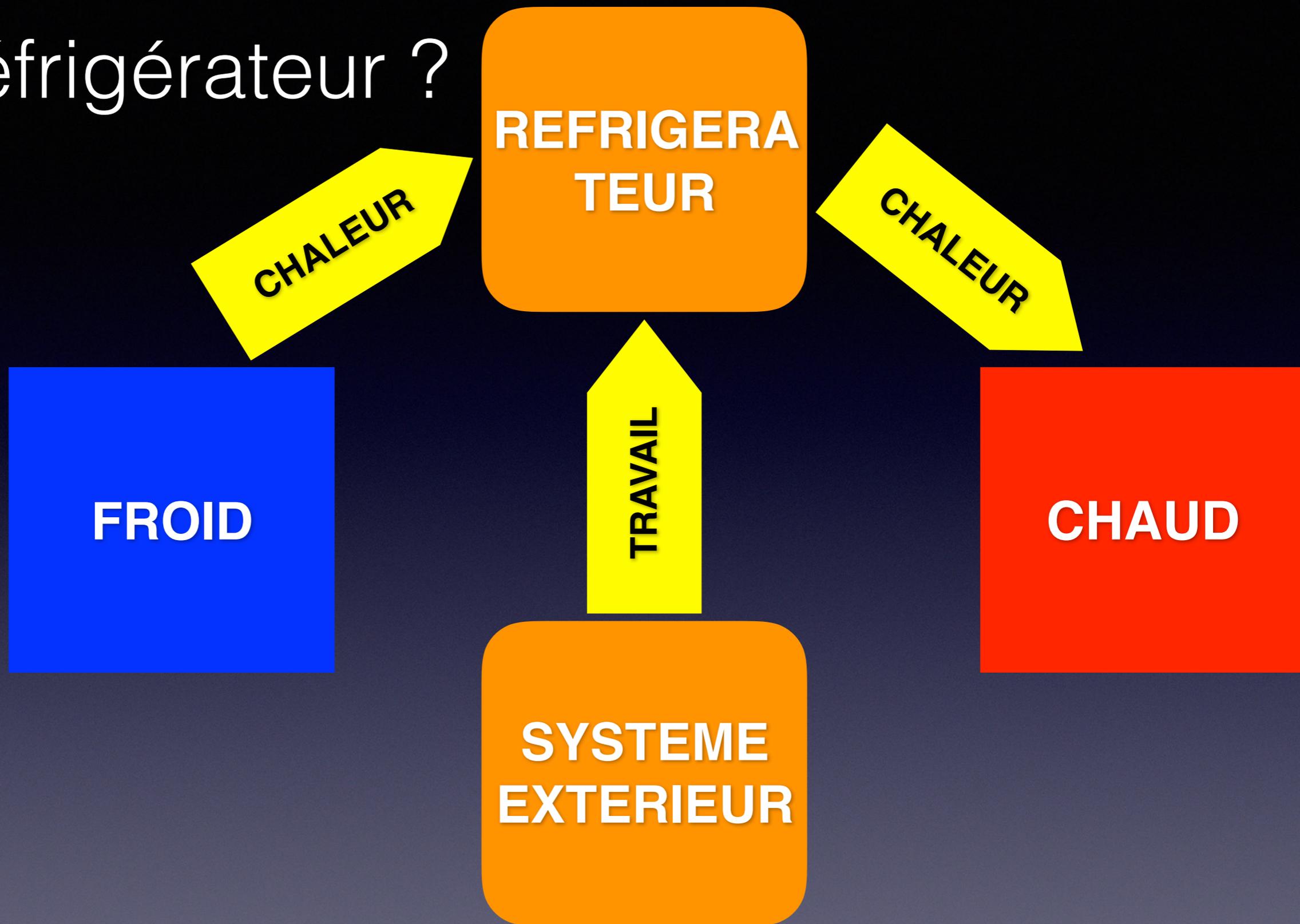
Economisez 5 fois plus d'énergie avec les ampoules à basse consommation d'énergie

2^{ème} Lois de la thermodynamique

La chaleur passe spontanément du corps le plus chaud vers le corps plus froid



Et le réfrigérateur ?



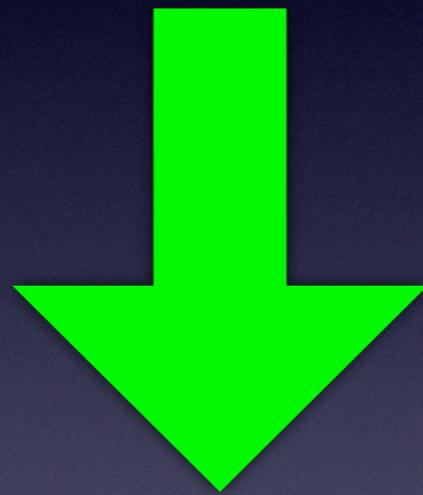
La chaleur ne passe pas spontanément du corps le plus froid vers le corps le plus chaud sans l'application d'un travail

Version alternative

Une transformation dont le résultat **unique** serait de transformer en travail la chaleur extraite d'un reservoir est impossible à réaliser



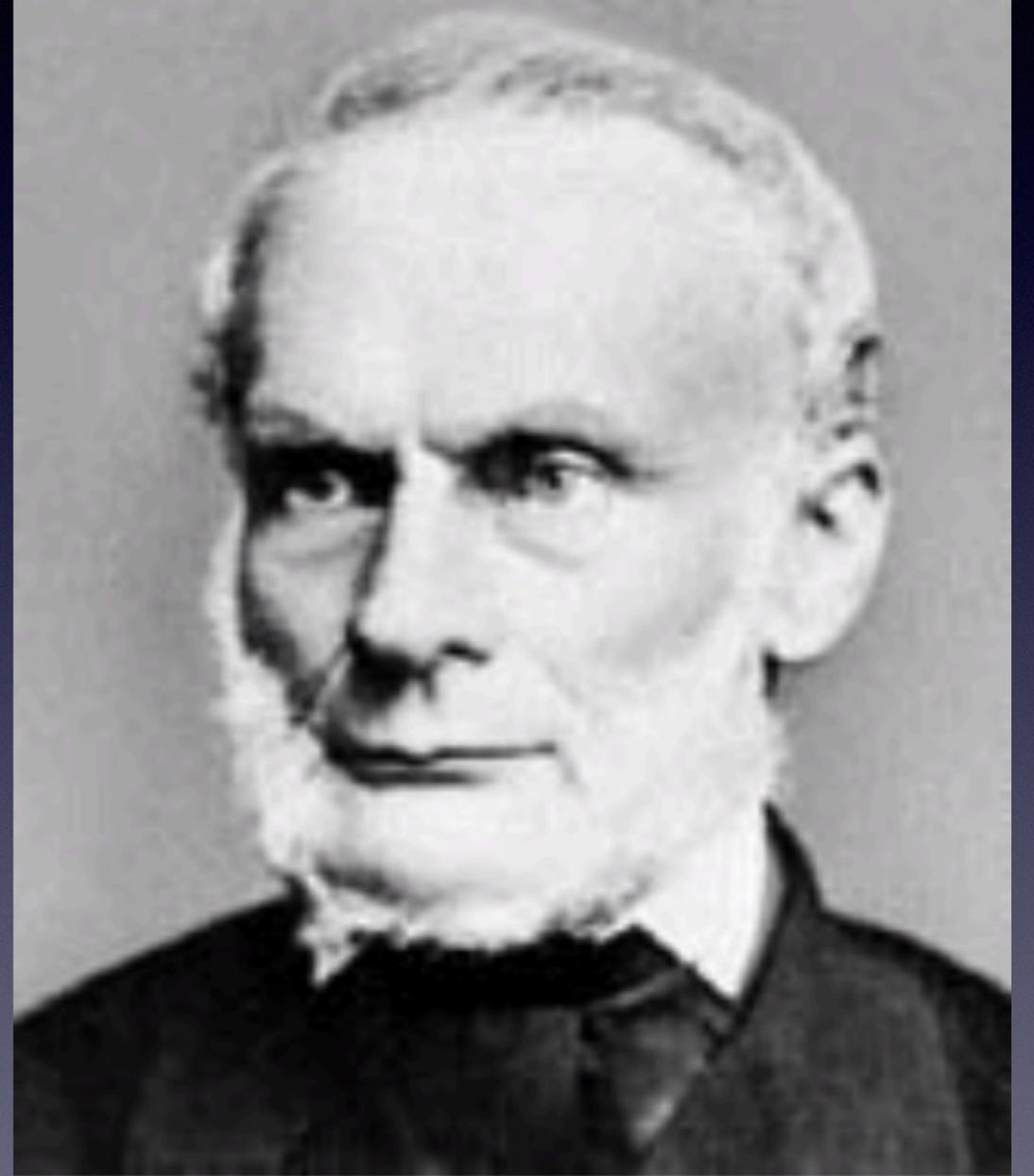
La flèche du temps
est apparue



Il faut introduire une
quantité physique adaptée

2^{ème} protagoniste : Rudolf Clausius (1822-1888)

- Physicien et mathématicien allemand
- L'un des fondateurs de la thermodynamique (énoncé du 2nd principe)
- Très patriotique au point d'ignorer ce qui était publié en dehors de la Prusse
- Inventeur du concept d'entropie



Naissance du concept d'entropie (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 τροπή une transformation.

Extrait de « *Sur diverses formes des équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur* »

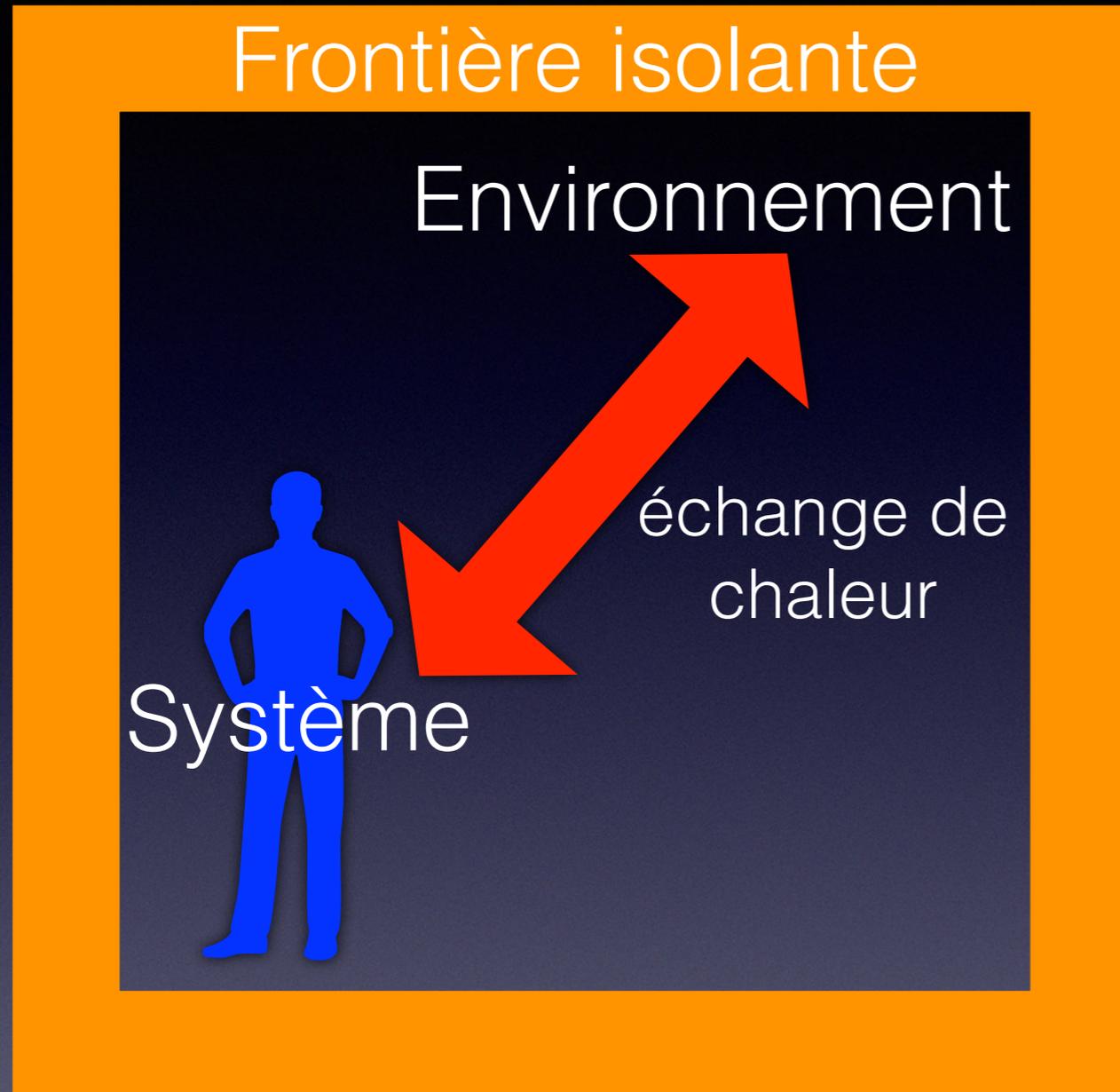
Inégalité de Clausius



$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}$$

La variation d'entropie est supérieure à la chaleur échangée (énergie dispersée) divisée par la température

...mais si le système est isolé...



$$\Delta S \geq 0$$

La variation d'entropie d'un système isolé est toujours positive (ou nulle)

Qu'est-ce qui est plus
proche d'un système isolé ?



L'univers !

Les 2 lois de la thermodynamique

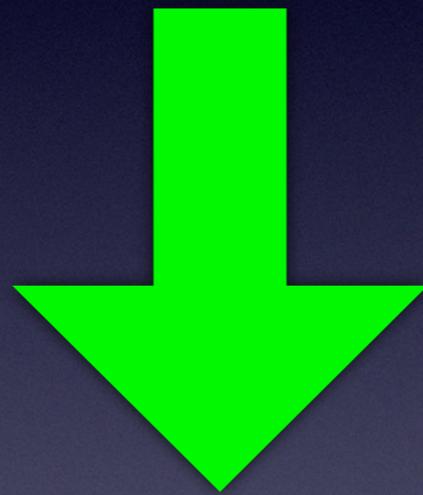
1. L'énergie de l'univers est constante

$$\Delta E = 0$$

2. L'entropie de l'univers tend vers un maximum

$$\Delta S \geq 0$$

C'est l'entropie qui permet
d'expliquer la flèche du temps

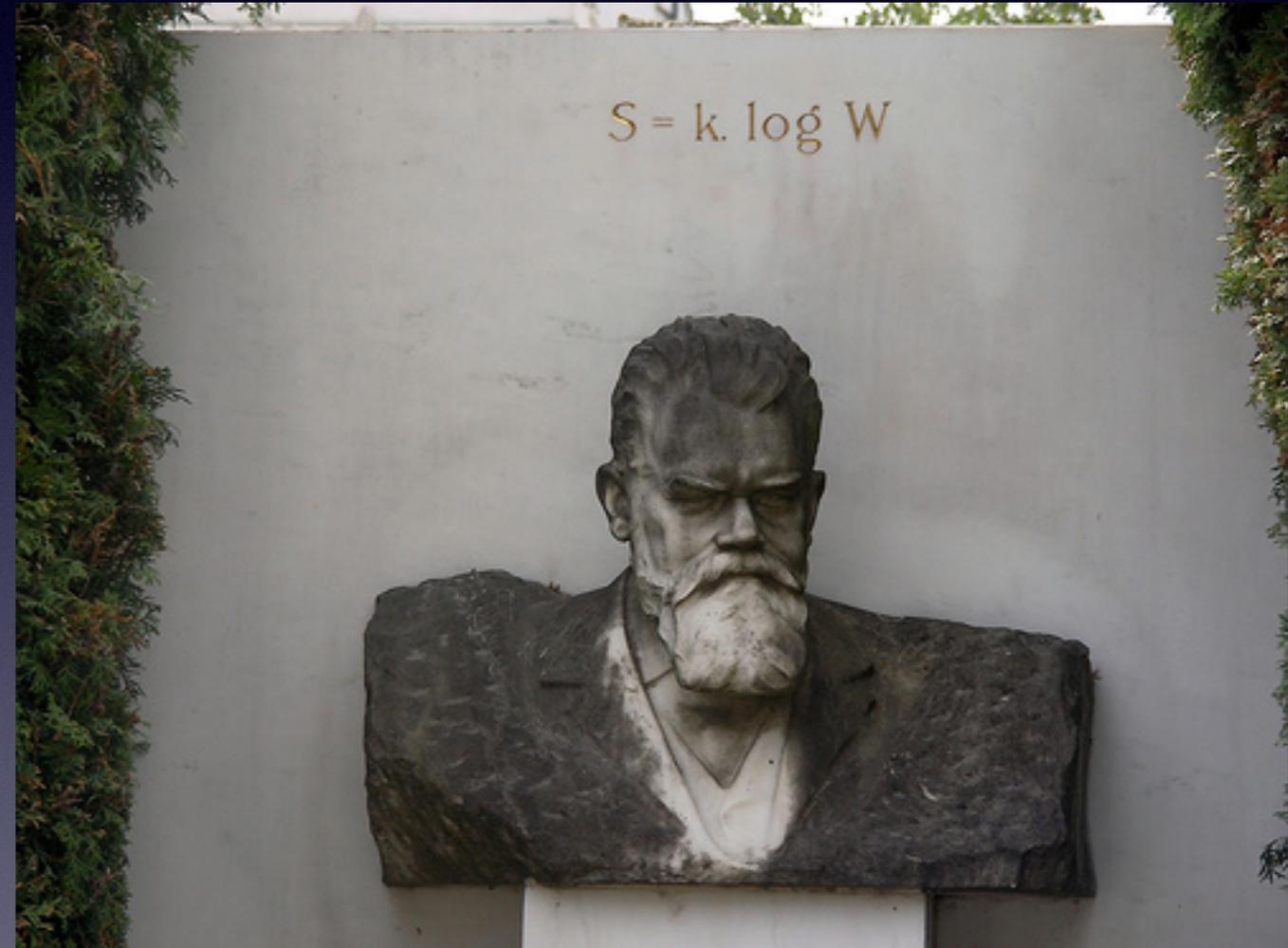


Quelle est sa
signification profonde ?

3^{ème} protagoniste : Ludwig Boltzmann (1844-1906)

- Physicien et philosophe autrichien
- Père de la physique statistique
- Fervent défenseur de l'existence des atomes
- Travaux de compréhension difficile reconnus après sa mort
- Troubles bipolaires jusqu'au suicide

$$S = k \cdot \log W$$

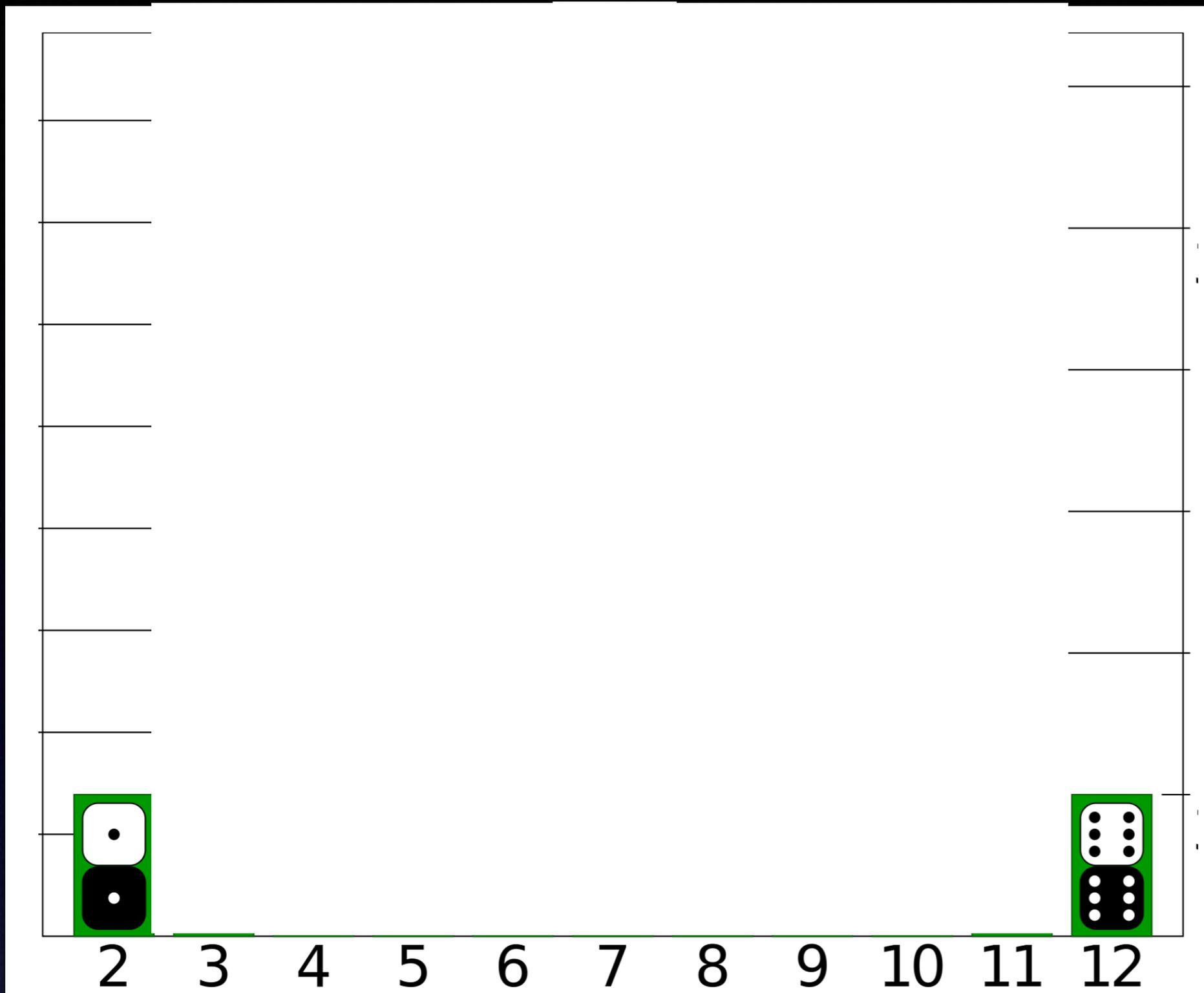


Qu'est-ce que W ?

Métaphore des dés



Macro- et micro-états

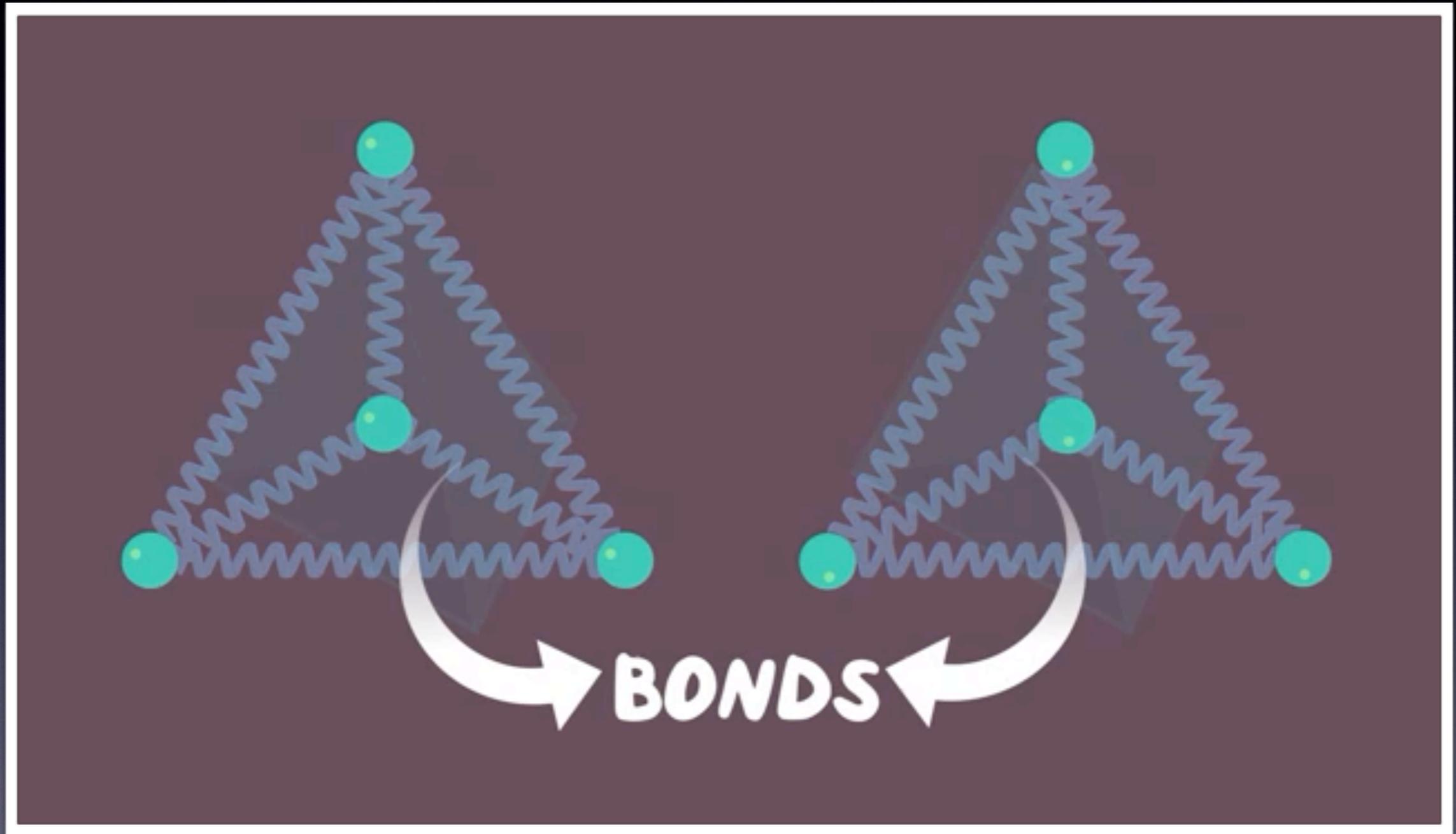


36 MICRO-ETATS



11 MACRO-ETATS

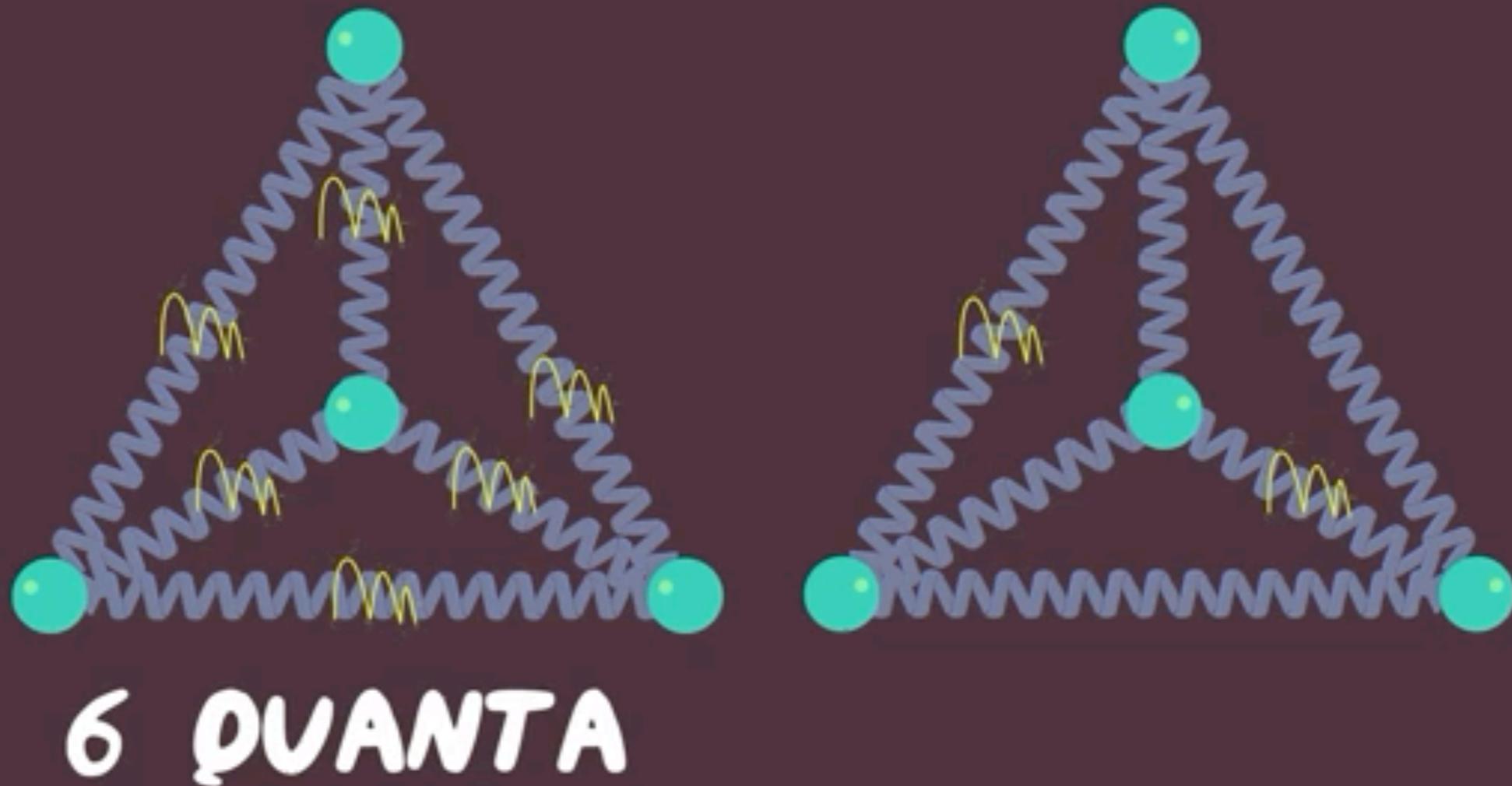
Energie stockée dans les corps



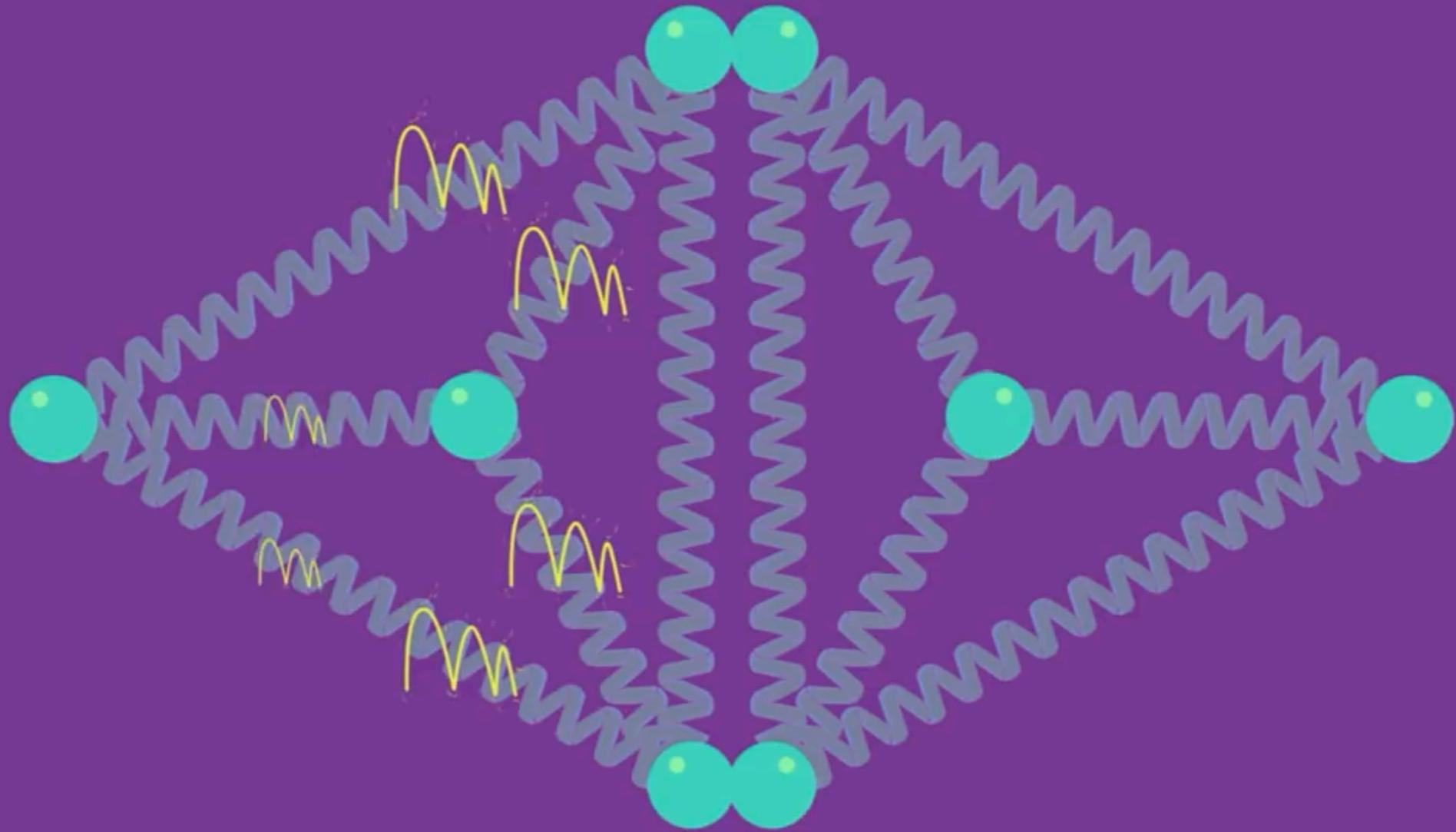
Les micro-états



Il faut compter les micro-états



Différentes façons de distribuer l'énergie entre 2 corps



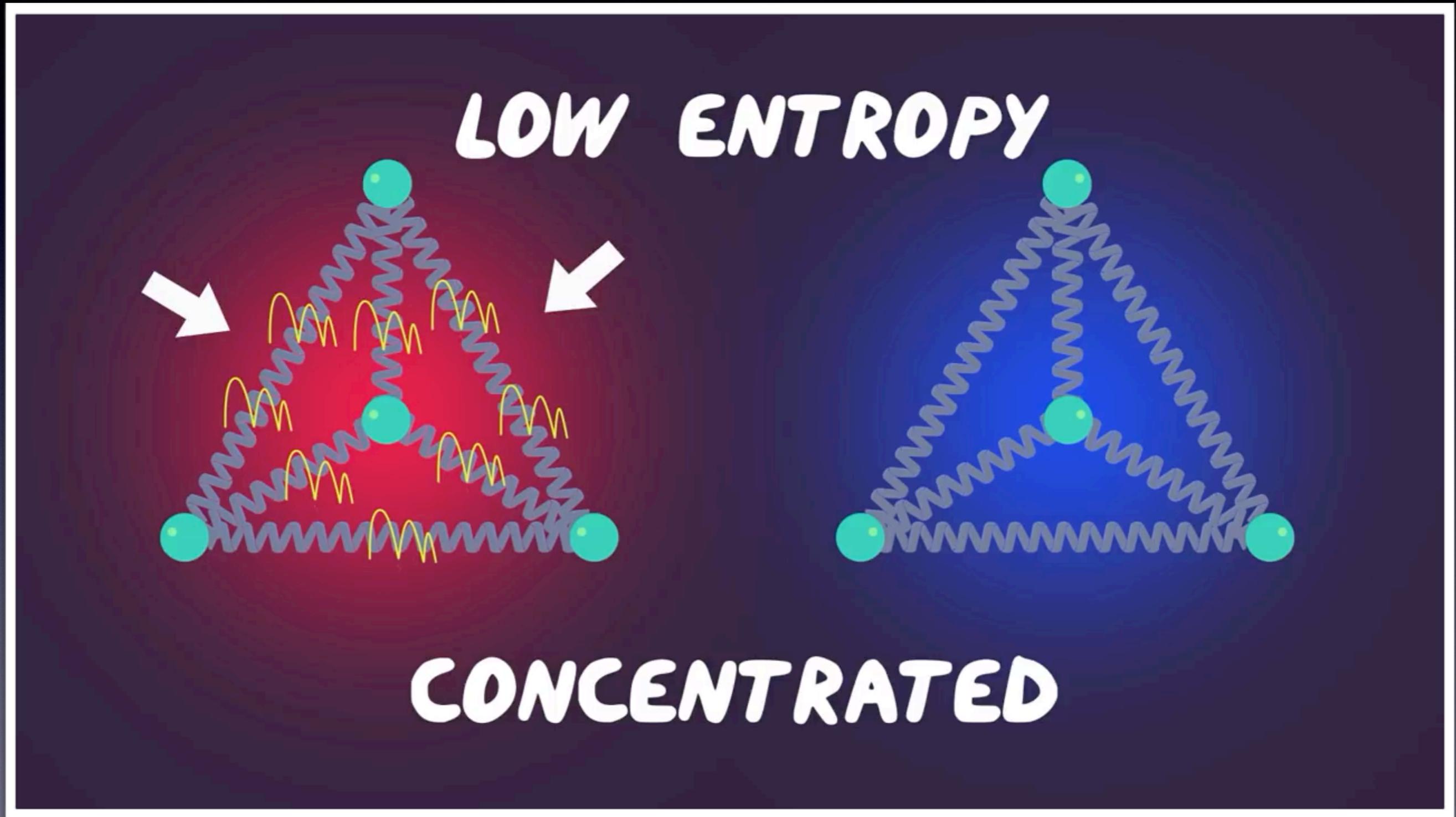
credits: TED-Ed (Jeff Phillips)

Certains macro-états sont plus probables

OCCURRENCE

QUANTA IN SOLID A	QUANTA IN SOLID B	PROBABILITY	NUMBER OF OCCURRENCES (MULTIPLICITY)
0	8	2%	1,287
1	7	6%	4,752
2	6	13%	9,702
3	5	19%	14,112
4	4	21%	15,876
5	3	19%	14,112
6	2	13%	9,702
7	1	6%	4,752
8	0	2%	1,287

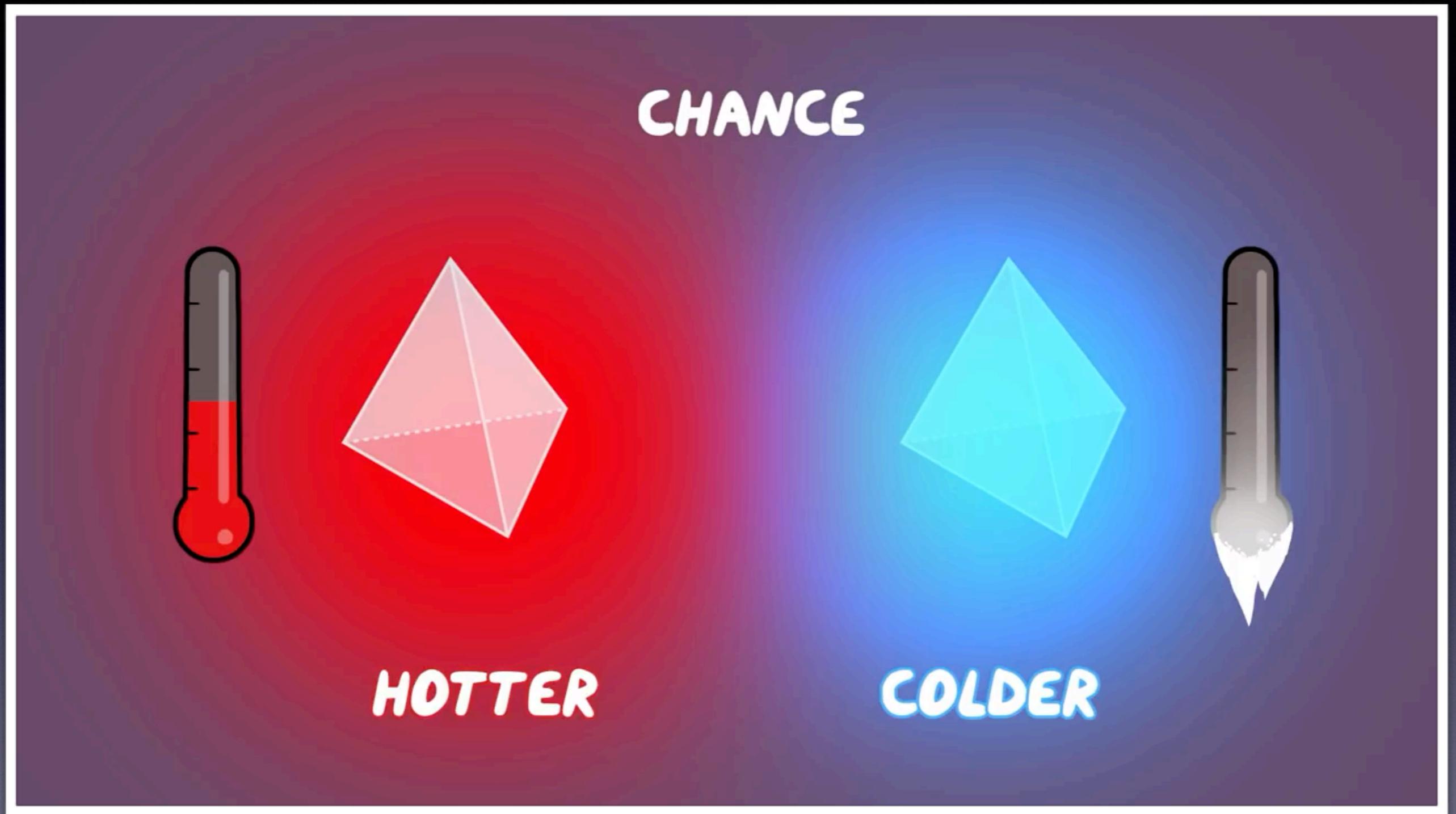
Basse entropie : énergie concentrée
Haute entropie : énergie étalée



La configuration change dans le temps



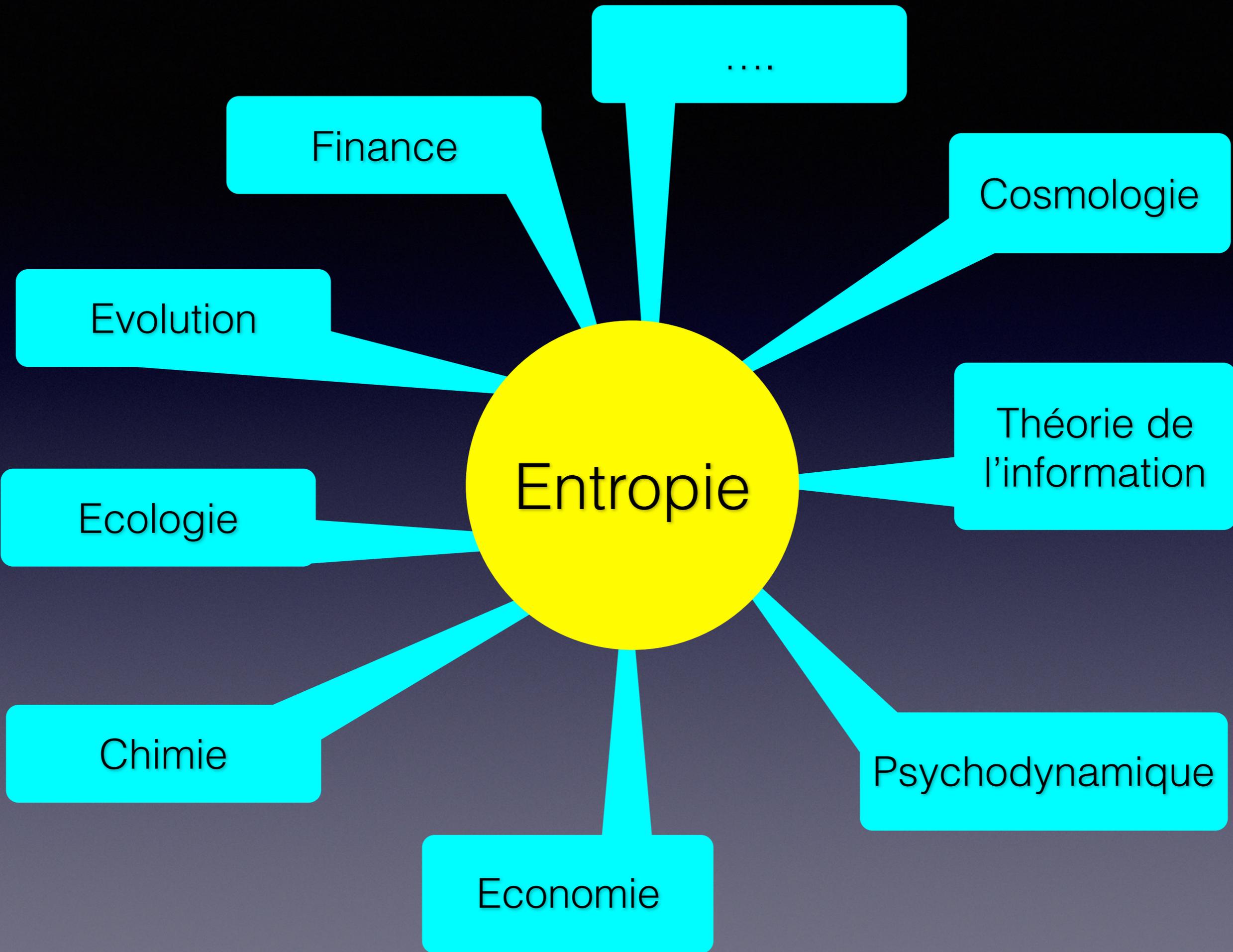
...et alors pourquoi on ne voit jamais la flèche du temps s'inverser ?



La flèche du temps tend vers une dispersion de l'énergie



credits: TED-Ed (Jeff Phillips)



Quelques citations

La thermodynamique est un truc marrant :

- La première fois que vous l'abordez, vous ne comprenez rien.
- La seconde fois que vous l'abordez, vous pensez tout comprendre, sauf un ou deux points.
- La troisième fois que vous l'abordez, vous savez que non, vous n'avez rien compris, mais ce coup-ci vous avez l'habitude et vous n'en avez plus rien à fiche.

A. Sommerfeld (physicien allemand)

Tout comme l'augmentation constante de l'entropie est la loi fondamentale de l'univers, la loi fondamentale de la vie doit être toujours plus fortement structurée et lutter contre l'entropie.

V. Havel (dramaturge et homme d'état tchèque)

La loi qui veut que l'entropie augmente toujours occupe, je pense, une position supérieure parmi les lois de la nature. Si quelqu'un vous montre que votre théorie est en désaccord avec les équations de Maxwell [...], alors tant pis pour les équations de Maxwell. Mais si votre théorie est en contradiction avec le deuxième principe de la thermodynamique, je ne peux vous offrir aucun espoir.

A. Eddington (astrophysicien)