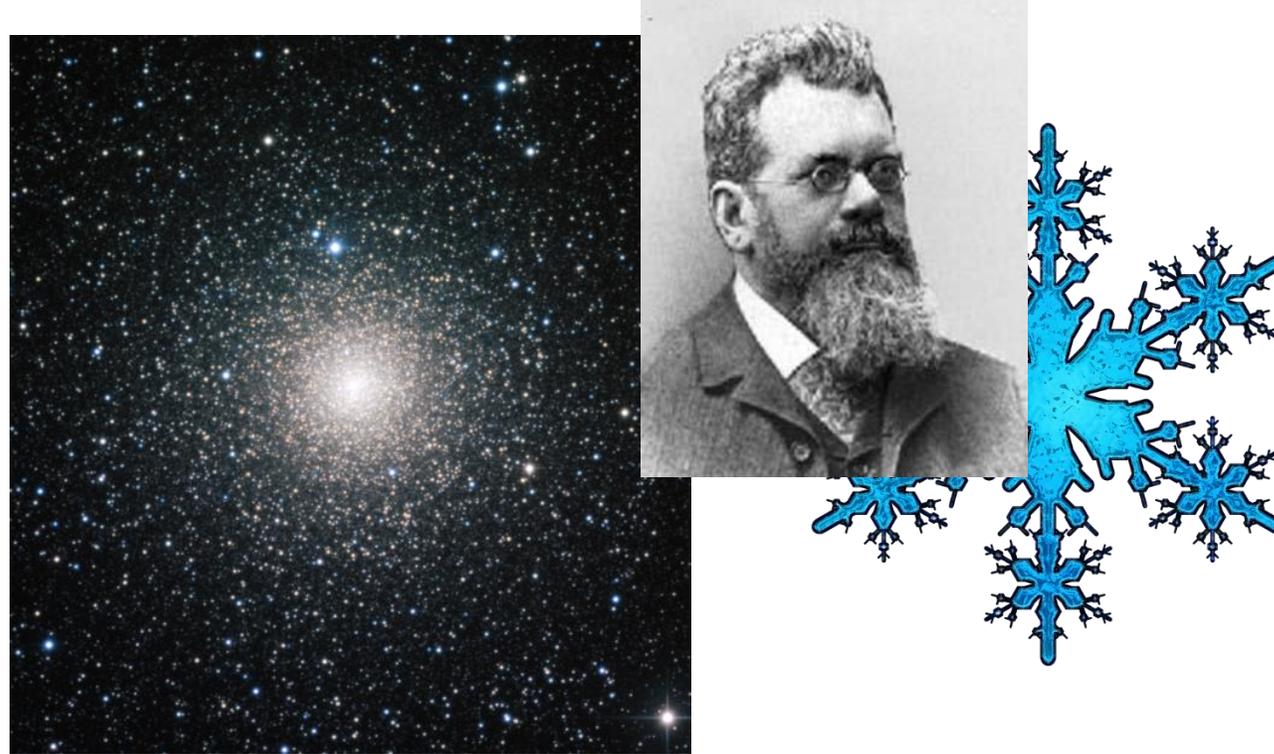


Ordre & désordre en physique

Boltzmann, le maître du hasard



Jérôme Perez



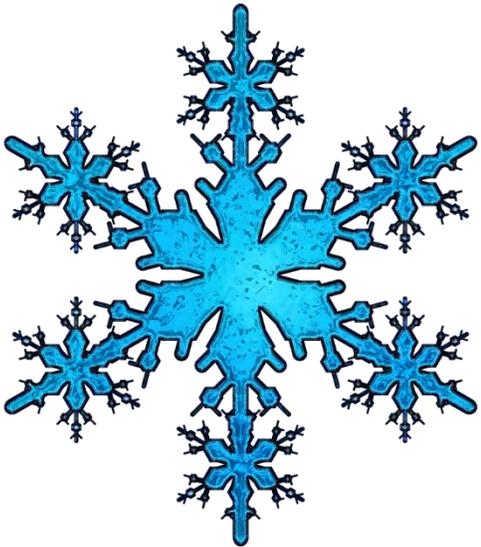
Laboratoire
de Mathématiques
Appliquées

Marathon des sciences 2016

La physique est une (la ?) philosophie de la nature

L'ordre et le désordre déterminent le monde...

Ordre : Symétrie particulière



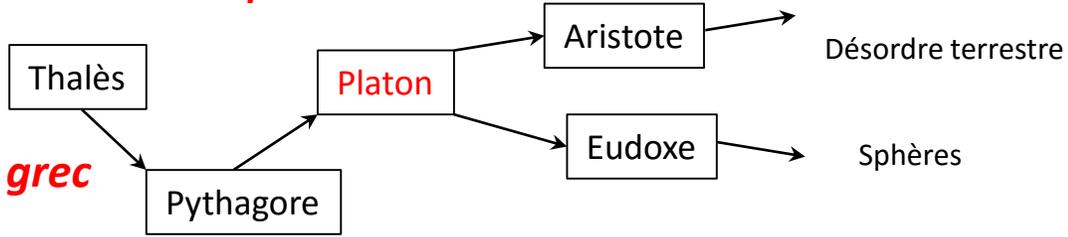
Désordre : Symétrie maximale



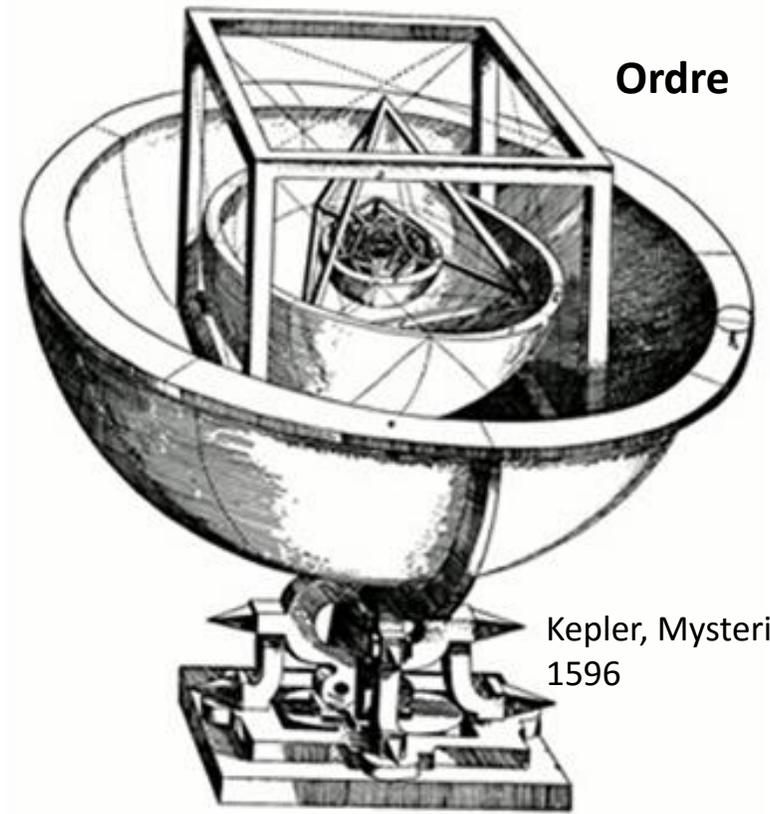
Ce n'est pas une idée nouvelle !

« sauver les phénomènes »

Le programme grec



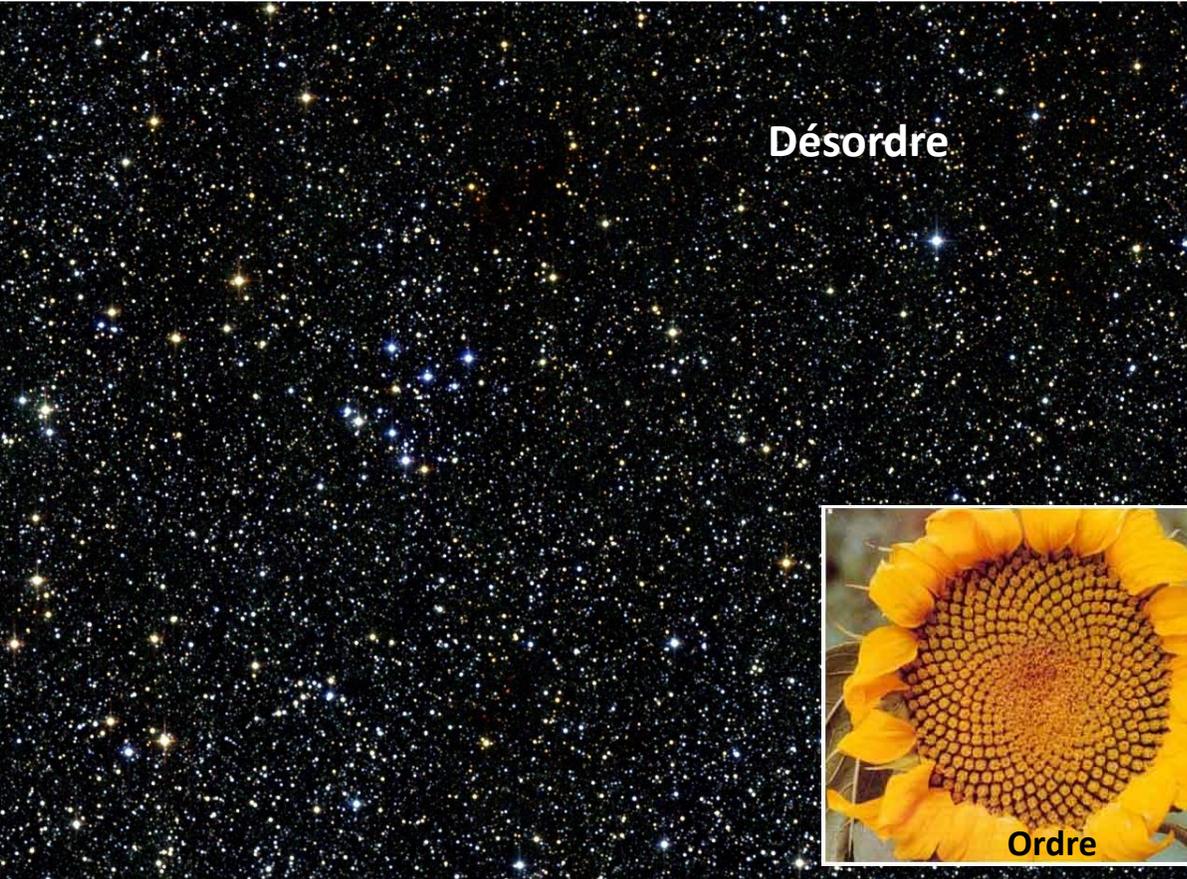
Sous-entendu en y mettant de l'ordre !
Recherche d'esthétique et de symétrie



Kepler, *Mysterium* 1596



Ordre



Désordre



Ordre

**Sous une forme ordonnée
les équations de la physique moderne**

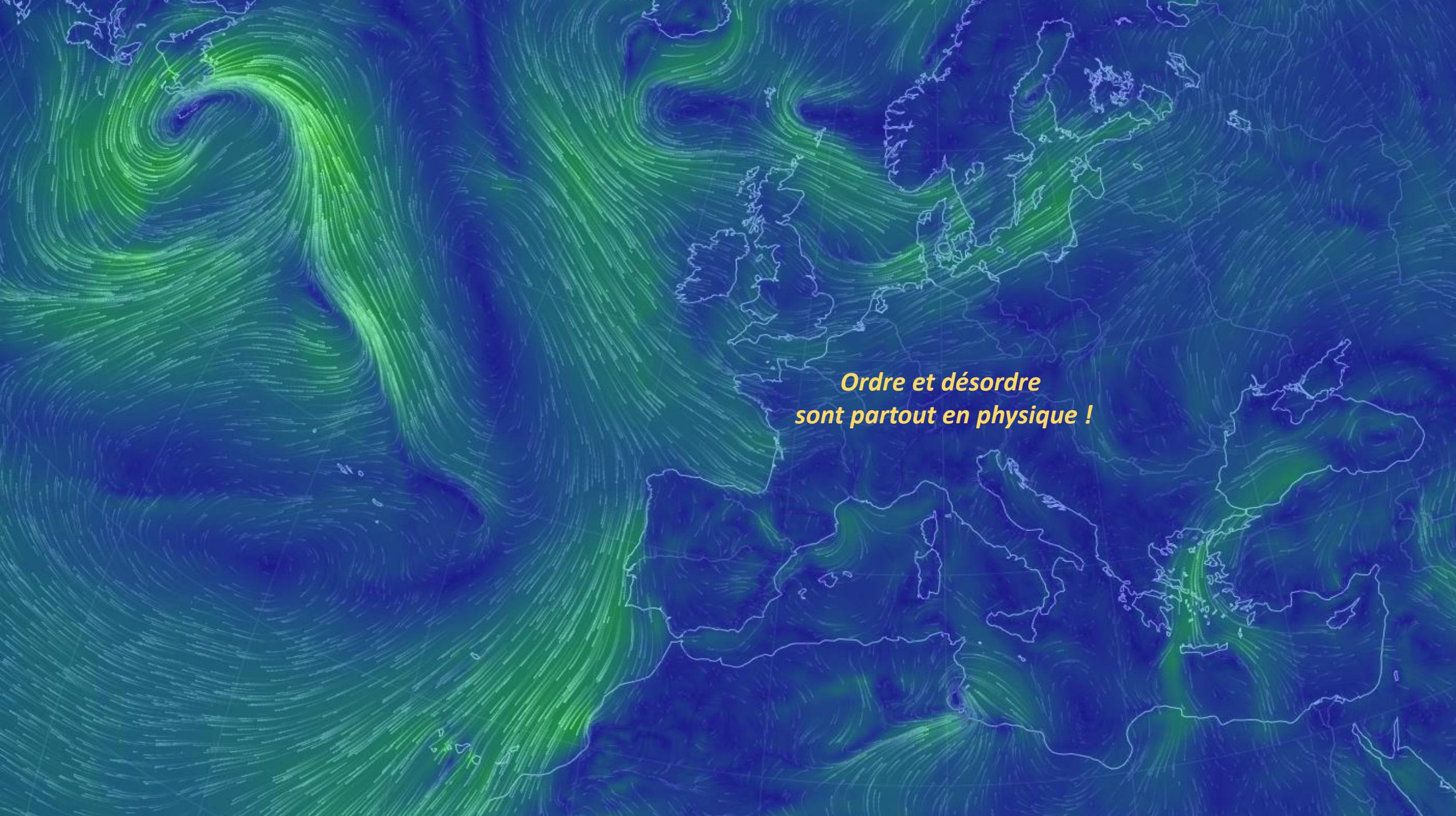
$$\frac{df}{d\lambda} = \langle \Lambda, f \rangle$$

description

Classique,
Quantique,
Relativité, ...

symétrie

mettent en scène le désordre



*Ordre et désordre
sont partout en physique !*

DESORDRE

L'Univers de Bianchi IX



Number 5, Jackson Pollock, 1948



Exp de Cornell & Wieman 1995, prix nobel 2001

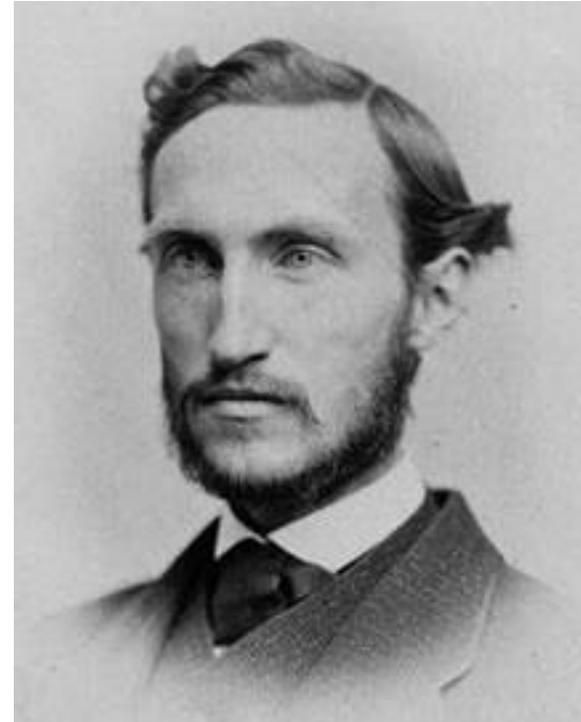
Composition II en rouge, bleu et jaune, Piet Mondrian, 1930

ORDRE

Le tournant de la fin du XIX^e siècle



Ludwig Boltzmann (1844-1906)



Willard Gibbs (1839-1903)

Une époque marquée !

Déterminisme



Pierre-Simon Laplace
(1749-1827)

L'état présent de l'univers est l'effet de son état antérieur, et la cause de celui qui va suivre.

Une intelligence qui [...] connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent [...] embrasserait dans la même formule les mouvements [...] rien ne serait incertain pour elle...

Fonde la théorie des probabilités

Positivisme scientifique

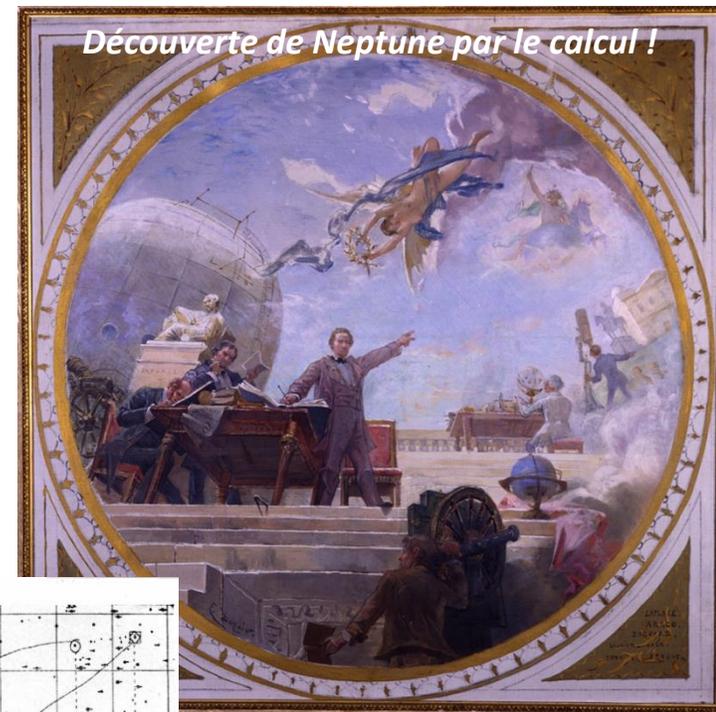


Auguste Comte
(1797-1857)
X promo restauration

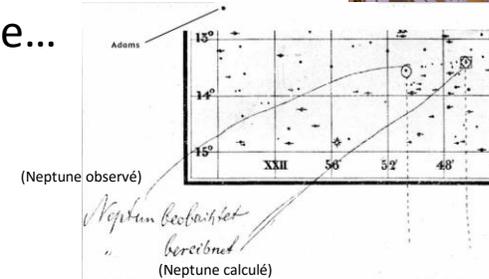
L'activité scientifique ne doit s'effectuer que dans le seul cadre de l'analyse des faits réels vérifiés par l'expérience.

L'esprit humain peut formuler les lois et les rapports qui s'établissent entre les phénomènes et ne peut aller au-delà

... on ne pourra jamais déterminer la composition chimique du soleil...



Esquisse peinte par Edmond-Louis Dupain pour un projet de plafond de l'observatoire de Paris, 1889



Le pragmatisme



Ernst Mach
(1838-1916)

L'hypothèse atomique est injustifiée
Elle n'est pas assez économique
Modèle énergétique

Fig. 12.

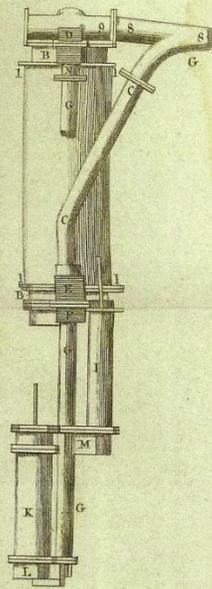


Fig. 11.

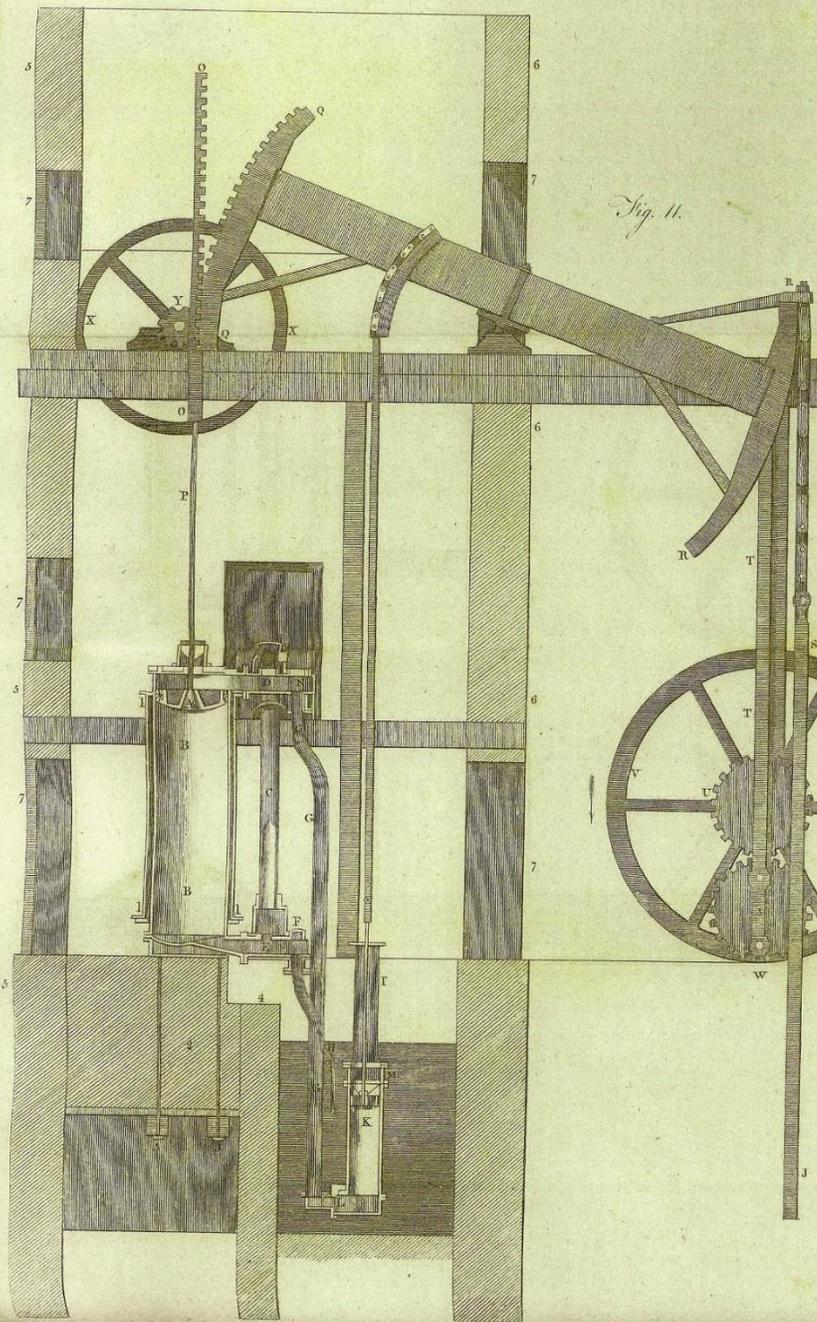
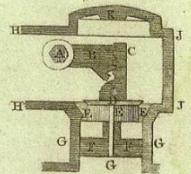
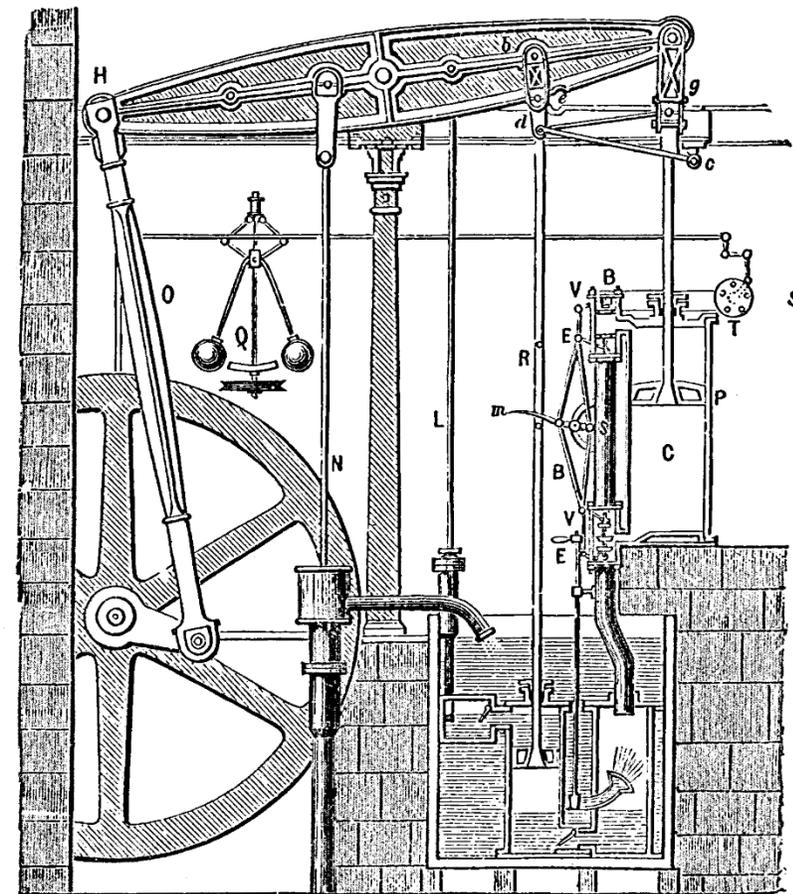


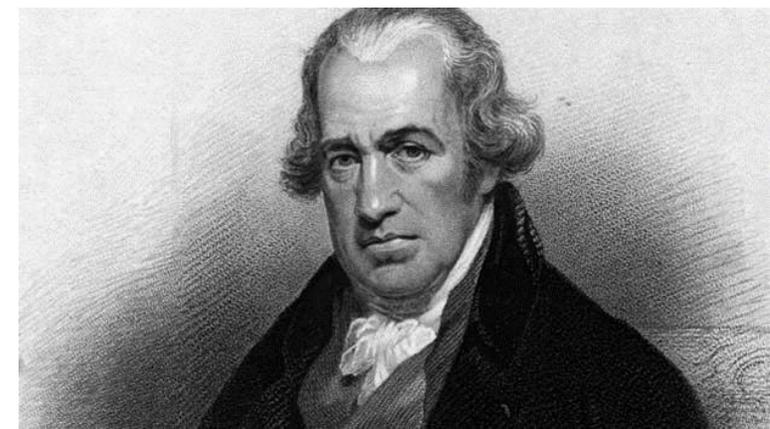
Fig. 13.

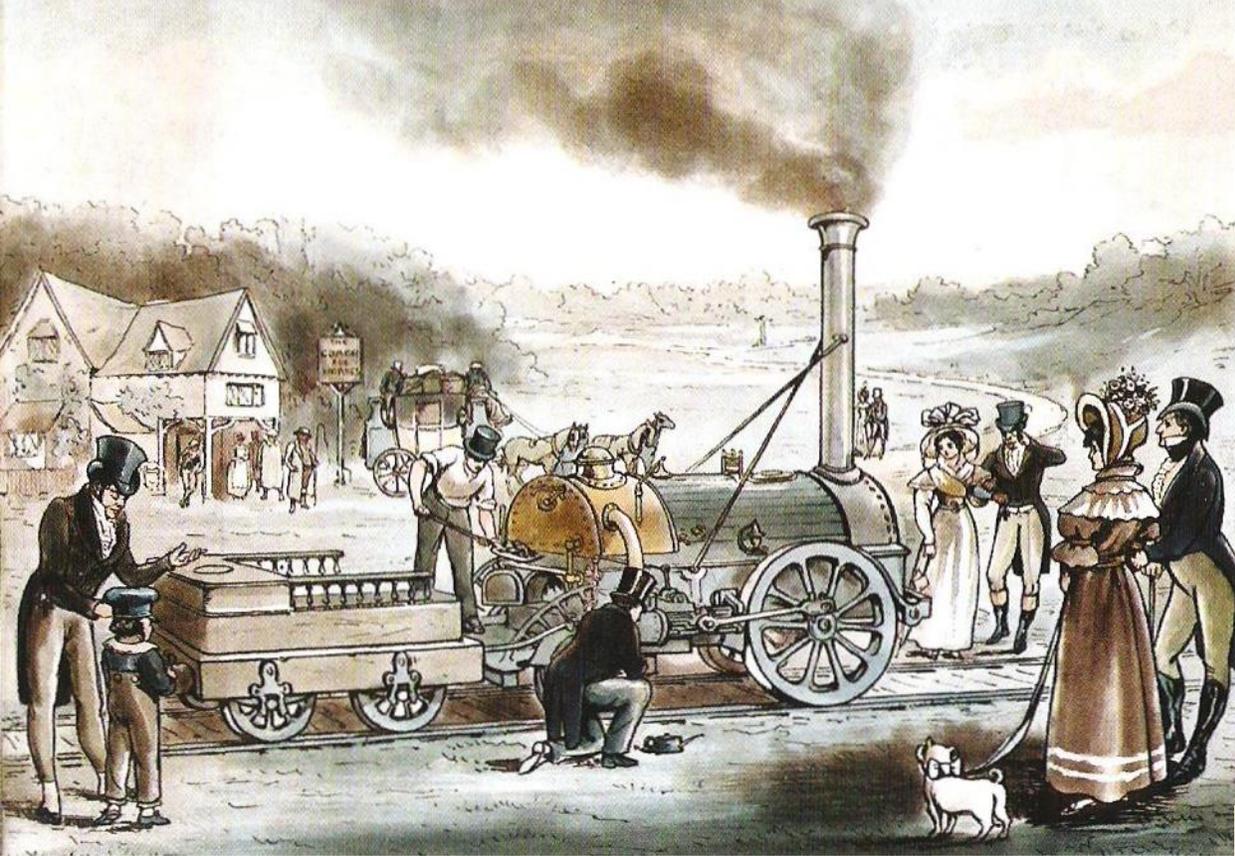


Les moteurs à vapeur



James Watt
1736-1819





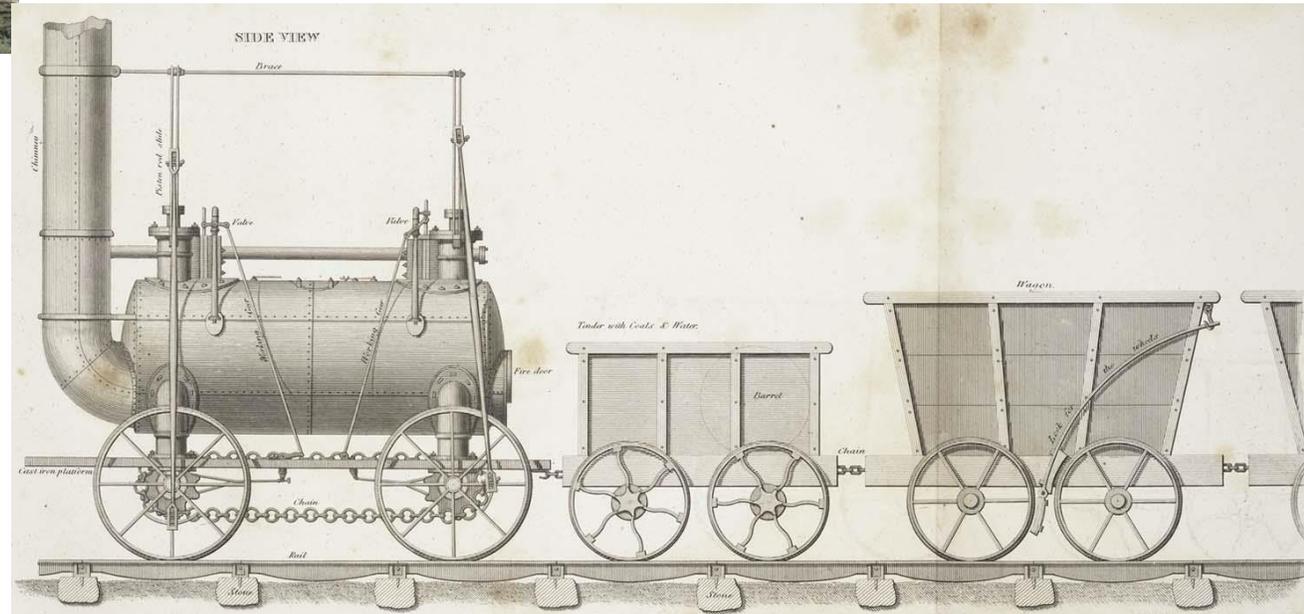
« The Rocket » sur la ligne Liverpool – Manchester - 1830

L'âge d'or de la thermodynamique
et de la mécanique

Les machines
à vapeur



George Stephenson
(1781-1848)



Thermodynamique, une construction lente...

Premier principe : conservation de l'énergie



James Prescott Joule
de 1841 à 1850

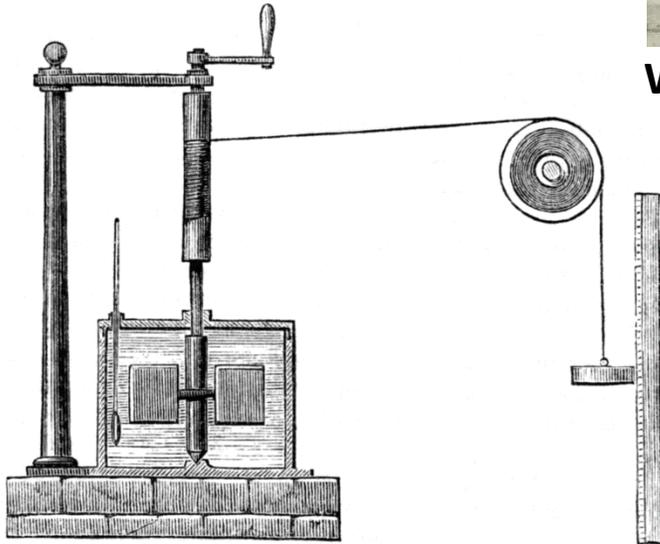
→ **Travail** ↔ **Chaleur**

Mouvement
Macroscopique

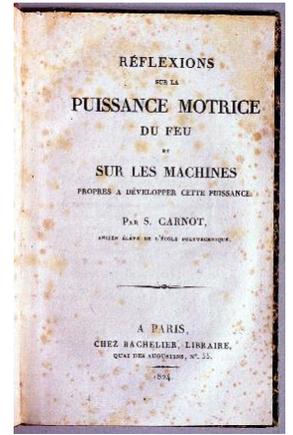
?



W : Force x déplacement
Exprimé en joule



Sadi Carnot, 1824



« On ne peut extraire qu'une quantité limitée de travail d'une source de chaleur »



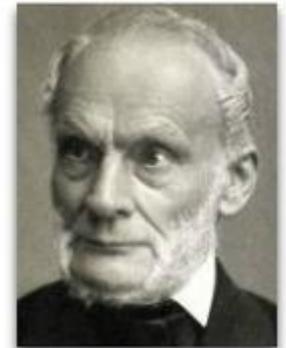
William Thomson
(Lord Kelvin)

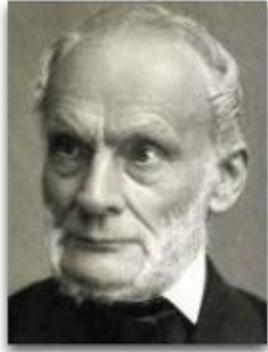
1848 : Définition de la température

Quantité de travail réalisée par un transfert de chaleur

Synthèse provisoire par Rudolf Clausius en 1850

« la chaleur et le travail sont des formes de transfert d'énergie »
« La somme des variations de travail et de chaleur correspondent à la variation d'énergie subie par un système »





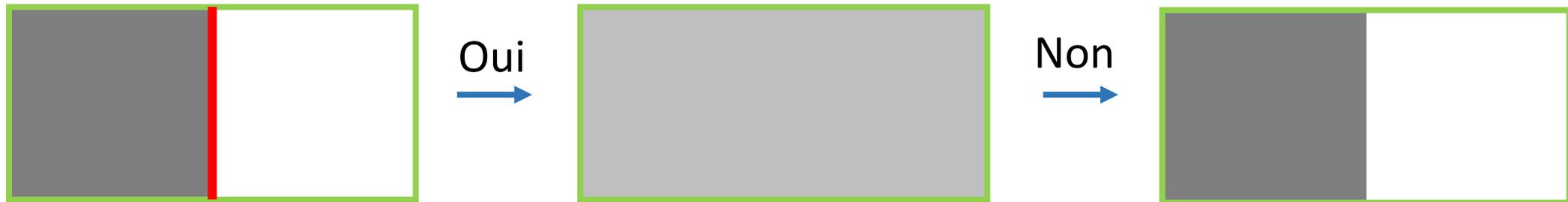
Le travail est un transfert ordonné d'énergie

La chaleur est un transfert désordonné d'énergie :

Si ce transfert désordonné est réversible il est entièrement convertible en travail
Sinon, une partie seulement pourra être « utilisée », l'autre sera dissipée !

Et inattendue ...

Certaines transformations sont impossible !



Second principe (de Clausius)

*Il existe une grandeur physique caractérisant ces transferts de chaleur appelée entropie.
Lors d'une transformation, l'entropie d'un système isolé ne peut que croître ou rester constante !*

On sait alors modéliser les machines thermiques, mais on y comprend rien !

C'est alors qu'intervient Ludwig Boltzmann...

Utilisation d'une description microscopique

La puissance du nombre & la force des probabilités



Ludwig Boltzmann en 1875 à 31 ans

1872 : Equation de Boltzmann et théorème H

1877 : Paradoxe de la réversibilité et $S = k \ln W$

Travail

Mouvement

Macroscopique



W : Force x déplacement

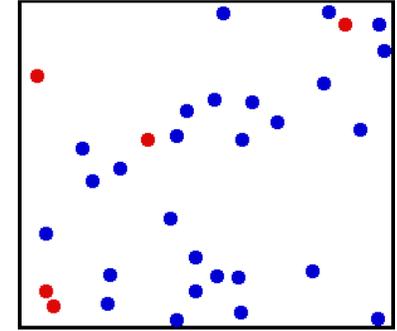
en joule



Chaleur

Mouvement

Microscopique



Q : Energie cinétique

en joule

L'entropie permet d'estimer la quantité d'information perdue quand on résume l'information microscopique par l'information macroscopique.

Elle augmente avec la capacité d'un système à être désordonné.

L'entropie est une fonction du nombre de façons d'obtenir le même état macroscopique avec états microscopiques différents

Ordre/désordre : avec Boltzmann c'est la fin des privilèges...

Chaque état d'un système possède la même probabilité de se produire mais les états ordonnés sont généralement beaucoup moins nombreux que les autres.



**Jeu de 5 cartes
(non magiques)**

1 seul état « ordonné »

Nombre d'états possibles

Il y a en tout $5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1$ ordres différents
soit 125 possibilités

1^{ère} carte : 5 possibilités

2^{ème} carte : la première a été choisie, il reste donc 4 possibilités

3^{ème} carte : les deux premières ont été choisies, il reste donc 3 possibilités

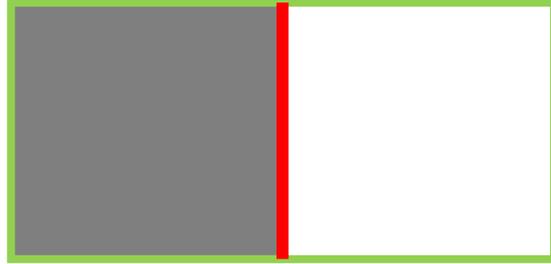
4^{ème} carte : les trois premières ont été choisies, il reste donc 2 possibilités

Dernière carte : il n'en reste plus qu'une !

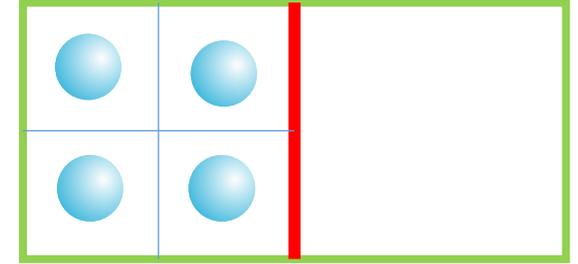
Si les tirages sont équiprobables « l'état ordonné » n'est qu'un parmi les 125 possibles !

Quand Boltzmann explique la détente de Joule !

En fait

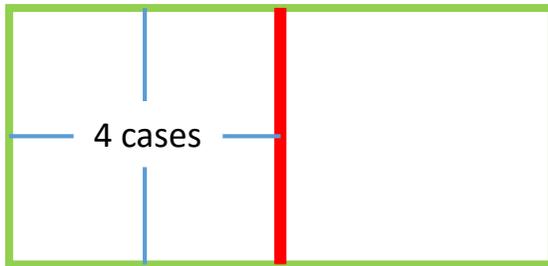


est la représentation macroscopique de



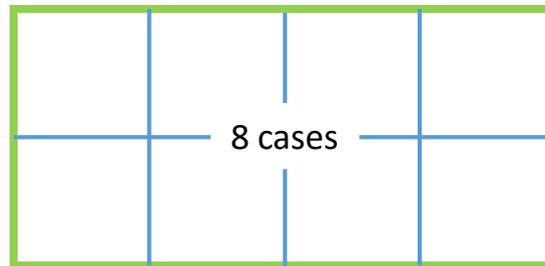
Lorsqu'on enlève la paroi on augmente le nombre de possibilités ...

Avant détente : répartir 4  dans



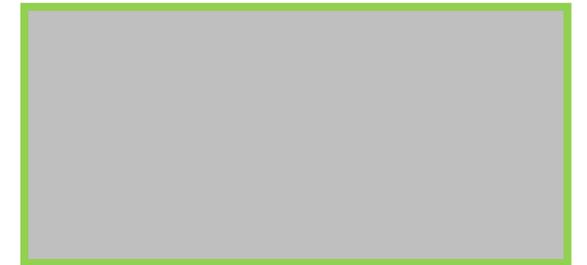
1 possibilité ...

Après détente : répartir 4  dans



1680 possibilités ... ($8 \times 7 \times 6 \times 5$)

Représentation macroscopique
d'une possibilité « normale »



En fait, dans 1 cm³ d'air il y a en moyenne
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 molécules

Une fois la paroi enlevée, la probabilité que toutes les particules se retrouvent à nouveau toutes à gauche de l'enceinte est plus qu'infime !

Le processus est statistiquement irréversible , l'entropie est démasquée !

C'est le début des problèmes...

Ernst Mach
(1838-1916)



Wilhelm Ostwald
(1853 -1932)



Les énergétistes

« La supposition atomique
n'est pas un recours possible ! »
... ni simple , ni sensible ...



Temps de récurrence : 10^{50} ans

« avec l'hypothèse des particules,
l'entropie **doit** être une fonction périodique »

Ernst Zermelo
(1871 -1953)



L'éternel retour

« Si le monde est composé d'un nombre fini d'éléments,
et si le temps qui lui est alloué est infini,
il repassera une infinité de fois par le même état »

Mise en évidence de l'électron (Perrin, Thomson, 1895 → 97)
hypothèse du photon (Einstein 1905),
puis du noyau atomique (Rutherford, 1911)



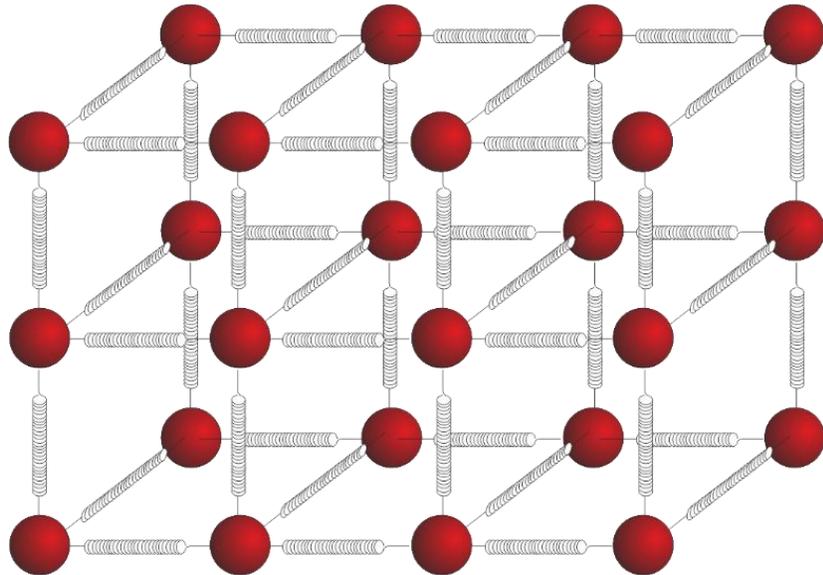
Henri Poincaré
(1854 -1912)



Friedrich Nietzsche
(1844 -1900)

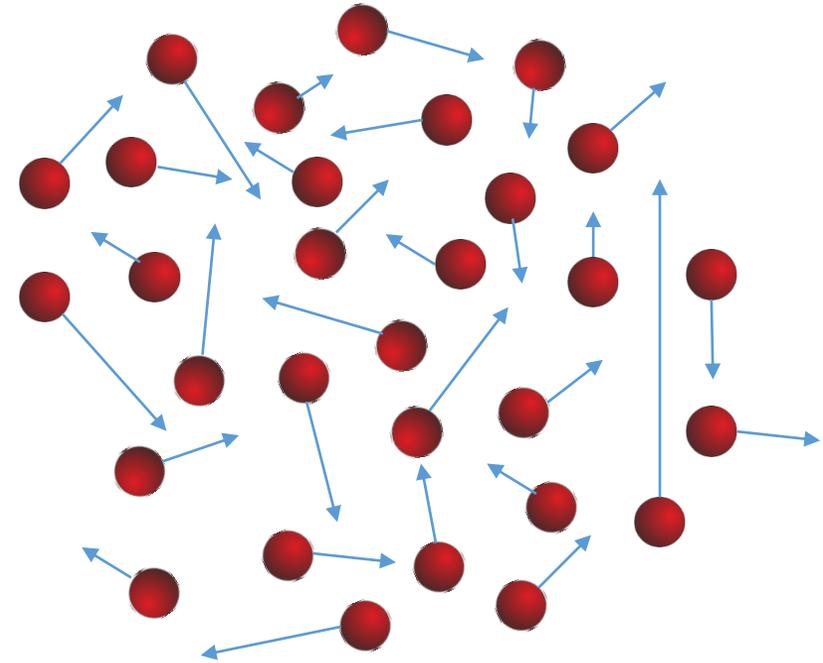
La méthode de Boltzmann ...

Ordre : Symétrie particulière



- d'interaction
- de vibration

Désordre : Symétrie maximale



← Brisure de symétrie →

**Dénombrement
des états d'énergie**

- de translation
- d'interaction (au cas où...)
- de rotation
- de vibration

Equilibre macroscopique : Etat le plus probable,
Réalisé par le plus grand nombre de configurations microscopiques

Ordre/désordre géré par Boltzmann

Modèle universel pour la physique moderne

Groupe de renormalisation

Magnétisme, modèle d'Ising
Transitions de phase,
Brisures de symétrie

Systèmes complexes

Vlasov, Plasmas, ...

Systèmes quantiques macroscopiques

Gaz parfaits quantiques,
Supraconductivité, superfluidité, ...



Systèmes cristallins naturels ou façonnés

Optiques, acoustiques, couplés

Algorithmes informatiques

Métropolis, automates cellulaires,
gaz sur réseau, ...

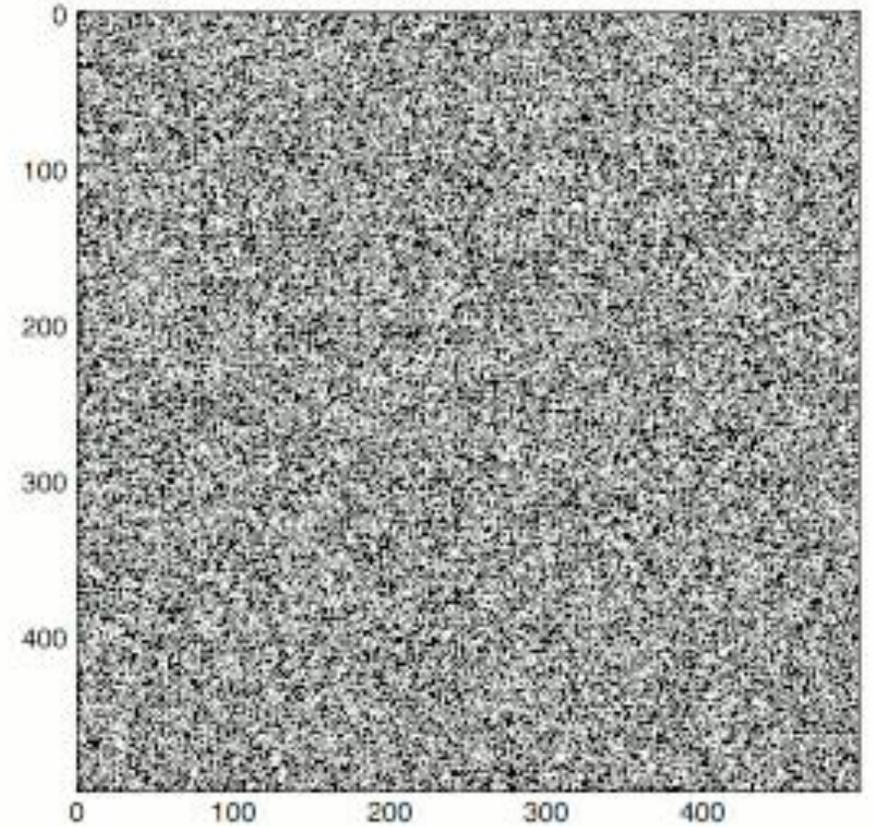
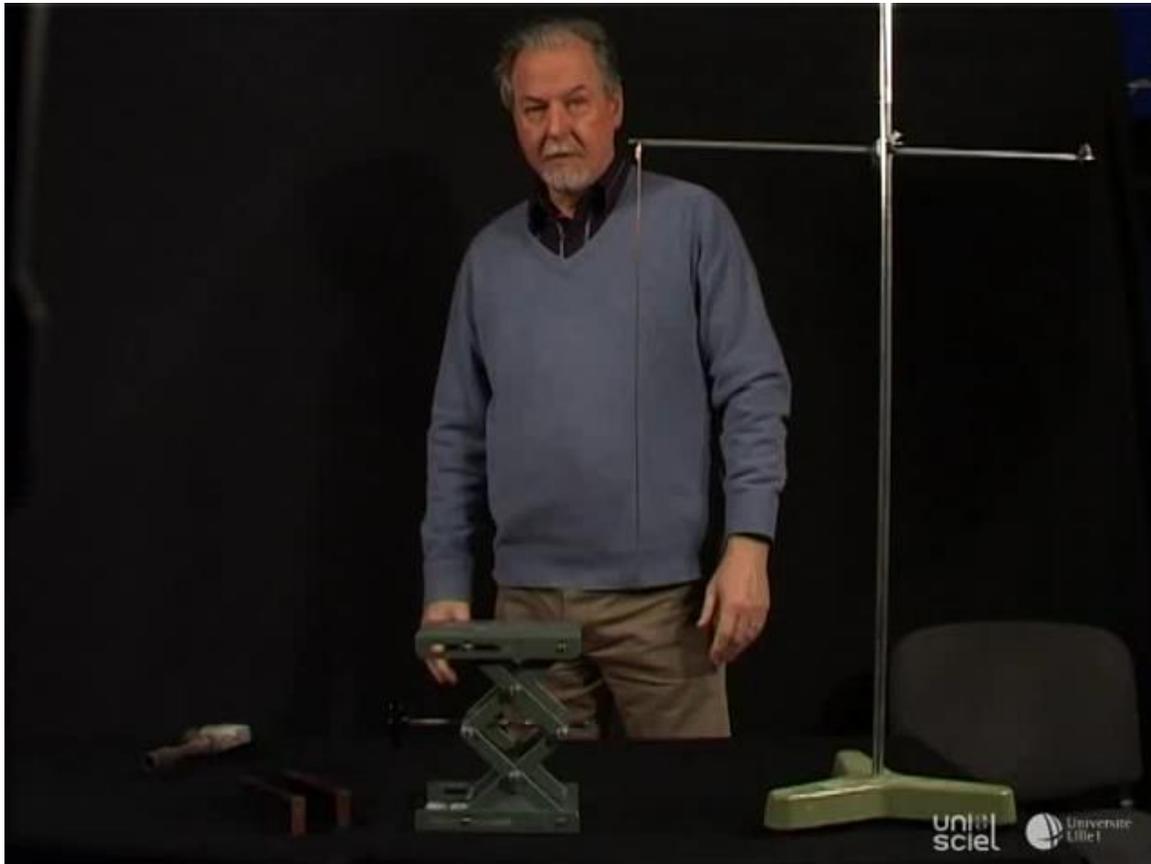
Systèmes proches d'un équilibre

Théorie d'Onsager, Phénomènes de transport

Transitions de phase

Des exemples magnétiques...

Température du Curie du fer



Trempe d'un modèle d'Ising 2D

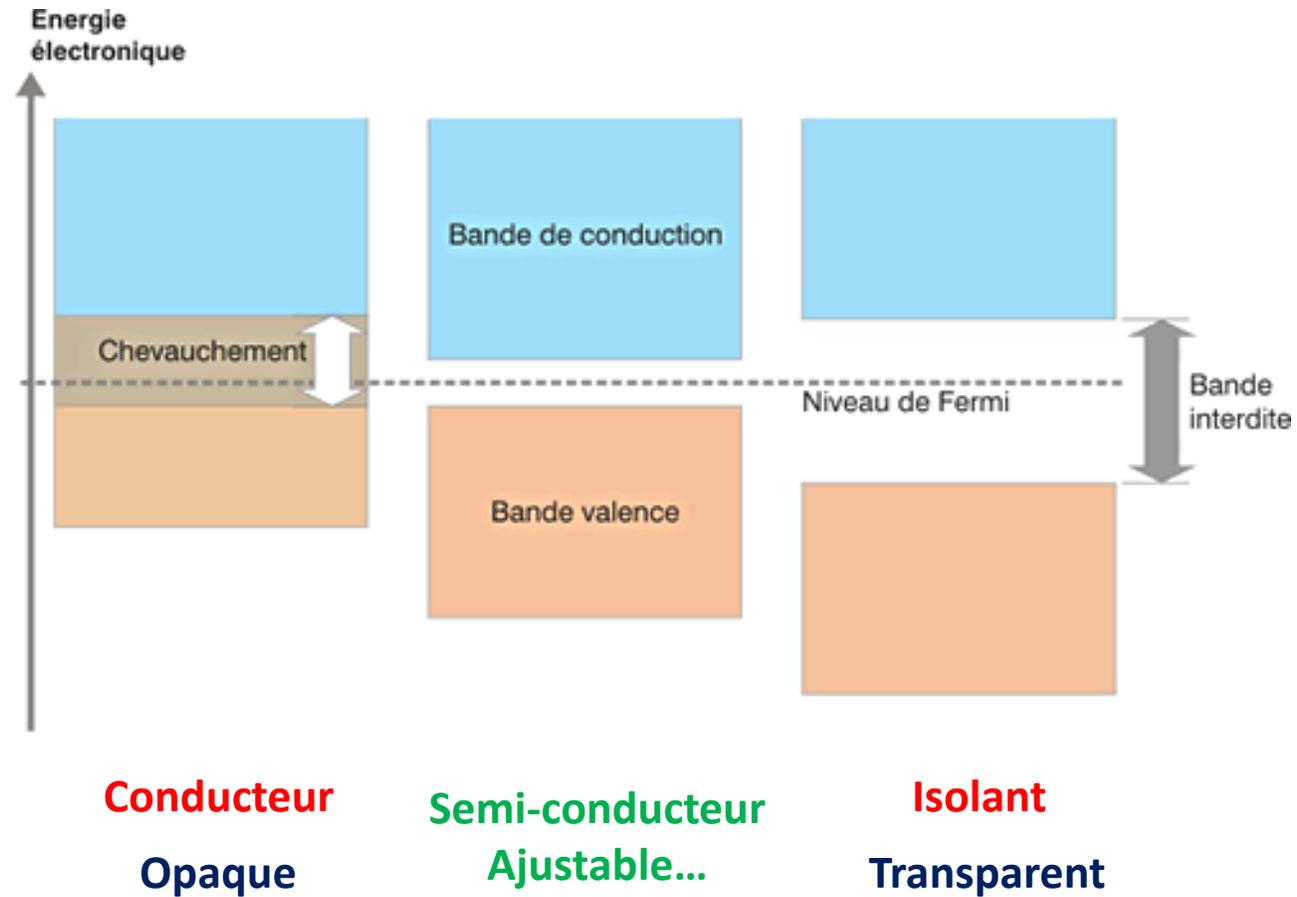
La théorie des bandes

Une structure ordonnée ne permet la propagation d'ondes que dans certaines conditions



La théorie des bandes

Les **électrons** ou les **photons** dans une structure ordonnée (périodique)



Conclusion partielle

Dans la nature (i.e. en physique), l'ordre n'est souvent qu'une apparence macroscopique !

Pour comprendre de très nombreux phénomènes physiques (flèche du temps, transitions de phases, équilibres, etc.), il est impératif de suivre la démarche de Boltzmann :

1. Décomposer l'ordre apparent (macro) en un désordre potentiel (micro)
2. Organiser cette décomposition à travers une entropie (comprendre ce que l'on perd...)
3. L'expliquer aux autres ... même si parfois c'est difficile de faire accepter ses idées !



Merci de votre attention

et

au suivant ...

