

Énergie et information: une chronique du rôle hésitant de l'observateur en physique

Didier Lairez
didier.lairez@polytechnique.edu
<http://didier.lairez.fr/>

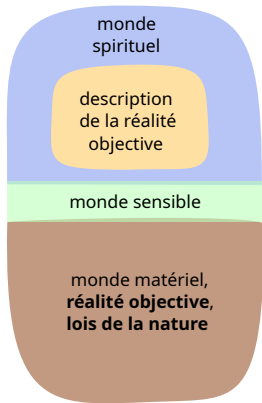
École polytechnique / CEA-DRF / CNRS (LSI, UMR 7642)
Les Petits Débrouillards de Bourgogne-Franche-Comté



L'énergie: monde matériel.

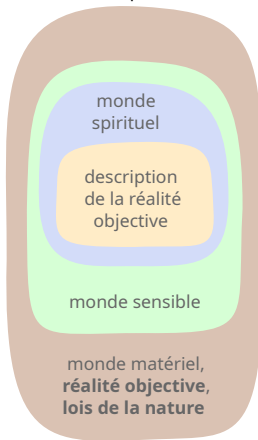
L'information: monde spirituel.

Dualisme platonicien



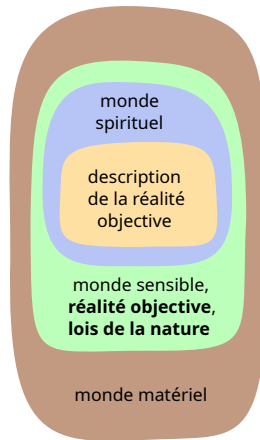
Platon,
Descartes, Bacon,
Pascal, les religions...

"Monisme platonicien"



Penchant naturel
de la plupart des
scientifiques

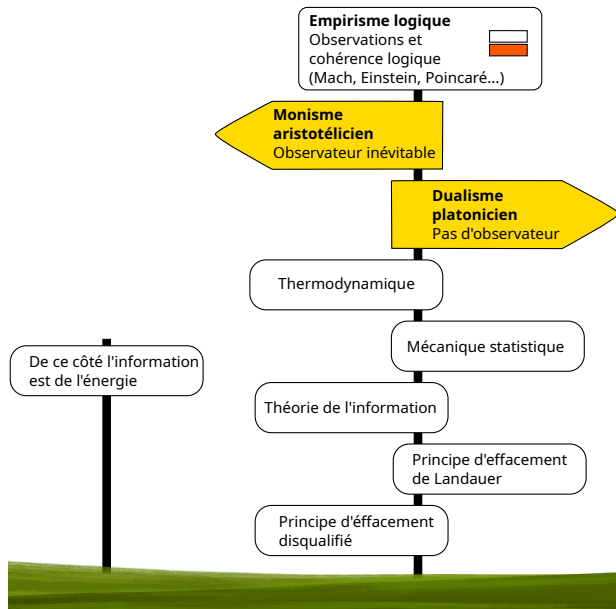
Monisme aristotélicien



Parménide, Aristote,
Épicure, Spinoza,
les lumières...

Évacuer l'observateur introduit des paradoxes.

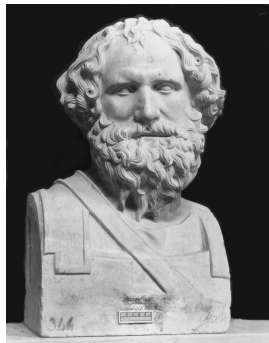
Plan de route (avec des Pauses)



Les prémices: l'invention de l'énergie

Force, travail,...

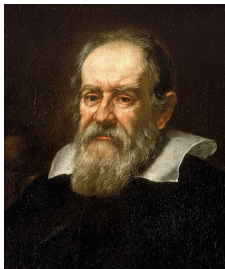
- ▶ Plusieurs façons de faire le même travail
- ▶ $\text{travail} = \text{force} \times \text{déplacement}$



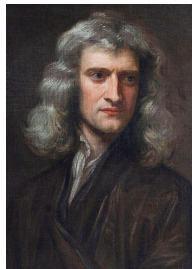
Archimède
(287-212 av.J.-C.)

mouvement,...

- ▶ Ce qui requiert du travail, c'est de mettre en mouvement les choses.
- ▶ Le mouvement à son tour peut produire du travail.



G. Galilei
(1564-1642)



I. Newton
(1642-1727)

Comme si une chose (une **force vive**) transmise par le travail était stockée dans l'objet en mouvement.

et potentiel

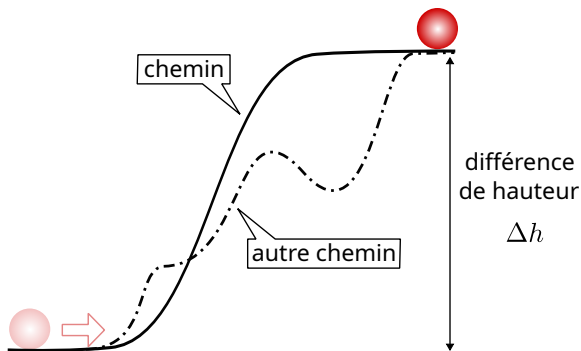
Une chose est stockée mais pas seulement par le mouvement

- ▶ Le potentiel:
potentiellement du mouvement,
potentiellement une **force vive**



W. Rankine (1820-1872)

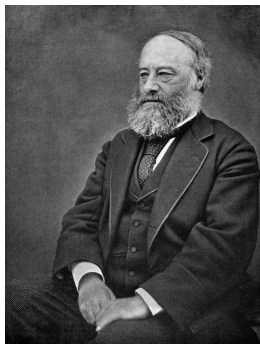
Parenthèse: le potentiel est une différence



- Une grandeur d'état dépend d'une différence entre deux états et non du chemin qui les relie.

La chaleur (le calorique) aussi

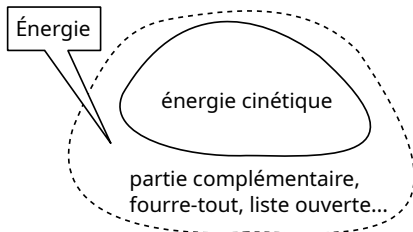
- ▶ Le travail produit de la chaleur
- ▶ ... et la chaleur peut produire du travail



J. P. Joule (1818-1889)

La chaleur et le travail sont deux moyens d'apporter une même chose à un corps: **l'énergie**.

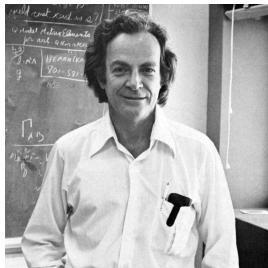
L'énergie est définie par un principe de conservation



- ▶ La conservation de l'énergie n'est pas une loi résultant d'observations que l'on généralise. Loi qui pourrait être invalidée par la découverte d'un bilan non nul.
- ▶ C'est une définition posée en amont: lorsqu'un bilan n'est pas nul, cela signifie qu'une nouvelle forme d'énergie vient d'être découverte.
Et la liste des énergies reste ouverte aux découvertes futures.

L'énergie est un concept

"Il est important de réaliser qu'en physique aujourd'hui, nous ne savons pas ce qu'est l'énergie."



R. Feynman (1918-1988)

- ▶ L'énergie n'est pas une découverte, c'est une invention.
- ▶ L'énergie est une abstraction.
Il n'existe pas de "particule d'énergie" (un objet matériel) qui existerait indépendamment de nous et de notre pensée.

L'énergie n'est pas très platonicienne.

Thermodynamique: la science des transformations de l'énergie

1er principe

La thermodynamique est phénoménologique et les phénomènes sont des changements observables.

- ▶ **L'énergie** se conserve... lors d'un changement.
-

- ▶ Principe 0:
L'équilibre c'est lorsqu'aucun changement ne se produit.
-

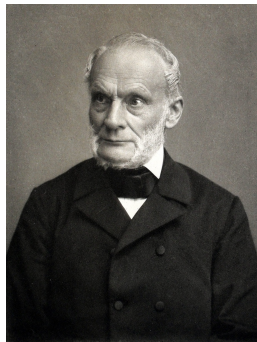
- ▶ **Le changement** introduit le temps et son irréversibilité.

2nd principe

- ▶ Réversibilité et cycle

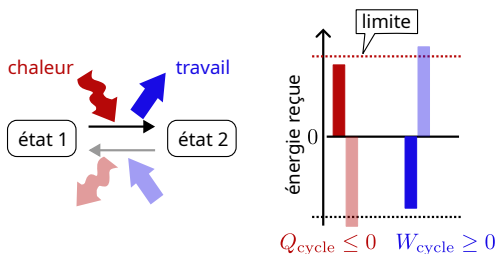
Pour un **cycle**:

- ▶ Quoi que l'on fasse, de la chaleur est toujours dissipée dans l'environnement.



R. Clausius
(1822-1888)

Entropie, de **entropé** (έντροπή): retour

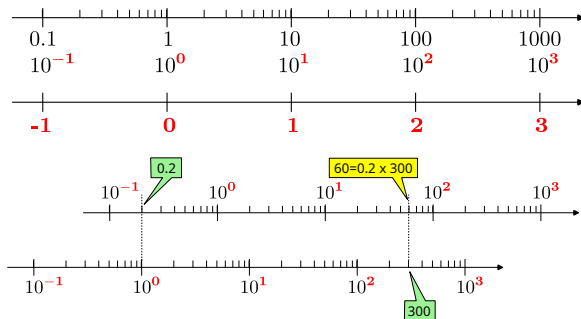


$$-W = Q \leq T \times \underbrace{(S_{\text{finale}} - S_{\text{initiale}})}_{\text{différence d'entropie}}$$

La **différence d'entropie** est le travail minimum pour retourner à l'état initial, ou l'opposé du travail minimum pour atteindre l'état final.

Corollaire: spontanément ($W = 0$) l'entropie ne peut que croître.

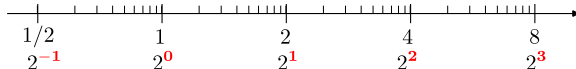
Interlude: logarithme



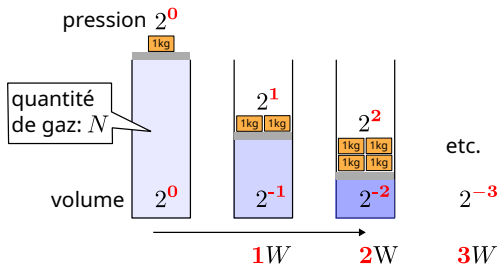
$$\log(n_1 \times n_2) = \log n_1 + \log n_2 \quad \log \frac{n_1}{n_2} = \log n_1 - \log n_2$$

Règle à calcul

En base 2:

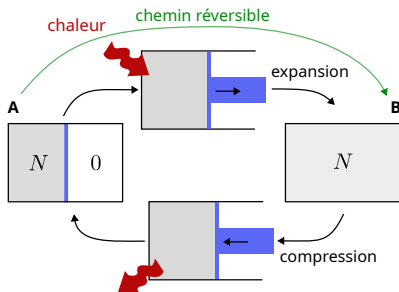


Une formule pour l'entropie

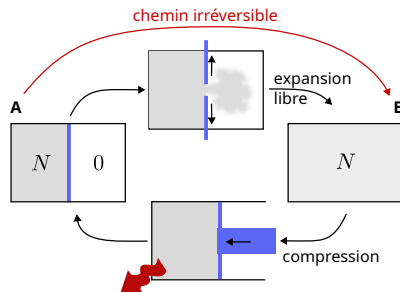


$$\begin{aligned}
 W_{\text{mini}} &= \text{force} \times \text{déplacement} = T \times N \times \log(V_{\text{final}}/V_{\text{initial}}) \\
 &= T \times N \times \underbrace{(\log V_{\text{final}} - \log V_{\text{initial}})}_{\text{différence d'entropie}}
 \end{aligned}$$

(ir)réversibilité thermodynamique



$$W_{\text{mini./cycle}} = 0$$

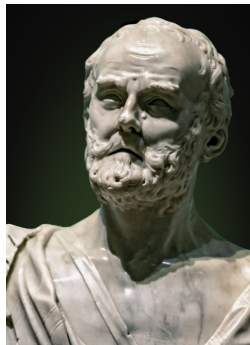


$$W_{\text{mini./cycle}} = T \times N \times \log 2$$

La réversibilité thermodynamique est une propriété du chemin.

Tout dépend de l'observateur

- ▶ Percevoir (ou non) un changement dépend de l'observateur.
- ▶ Considérer pertinent (ou non) un changement aussi.



Héraclite
(~500 av.J.-C.)

“On ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve.”

L'énergie n'est pas très platonicienne et l'entropie non plus

- ▶ *“L'idée de dissipation de l'énergie dépend de l'étendue de notre connaissance.”* J. C. Maxwell (1878)
- ▶ *“Ce sont des états de systèmes, définis de manière incomplète, qui constituent le problème de la thermodynamique.”* J. W. Gibbs (1874)

Mécanique statistique:
les atomes entrent en jeu

Réductionnisme



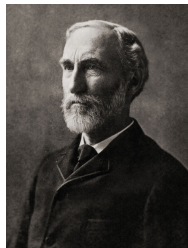
J. C. Maxwell
(1831-1879)



L. Boltzmann
(1844-1906)



M. Planck
(1858-1947)



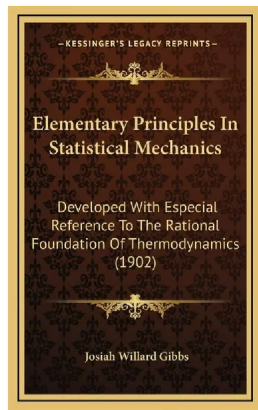
J. W. Gibbs
(1839-1903)

- ▶ Tout déduire de la **mécanique** de Newton appliquée aux atomes.
- ▶ Motivations:
 - 1) unifier (réaliser une économie de pensée)
 - 2) accéder aux propriétés intrinsèques des choses

Fondement rationnel de la thermodynamique

Pour Gibbs:

- ▶ **La thermodynamique a besoin d'un fondement rationnel**
- ▶ Comprenez: par la raison il est possible d'évacuer l'observateur (platonicien).



Deux problèmes fondamentaux

- Agitation thermique:
un système change en permanence de **configuration microscopique**.

1. **La définition de l'équilibre** (pas de changement) n'est plus valable.

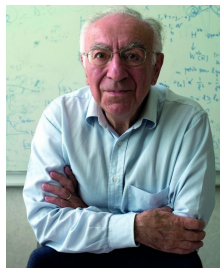
Laquelle donner?

2. On ne peut espérer connaître la configuration microscopique à un instant donné qu'en terme de **probabilité**.

Avec quelles valeurs de probabilité démarrer les calculs?

Probabilités des configurations microscopiques?

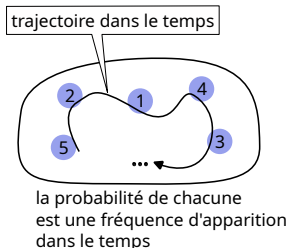
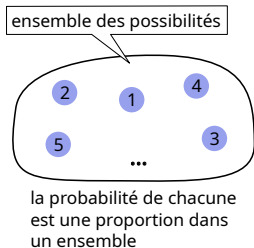
- **Une réponse pragmatique:** *“Étant ignorant la réponse est simple : il suffit d'énumérer les événements possibles et de leur attribuer des probabilités égales.”* (R. Balian)



P.-S. Laplace (1749-1827) R. Balian (1933-) R. L. Ellis (1817-1859)

- **Objection:** *“Ce n'est pas parce que nous sommes ignorants d'une chose qu'on en sait quelque chose.”* (R.L. Ellis)

La solution: l'hypothèse ergodique



- Si le système est déterministe, la trajectoire est une chaîne de causalité. La cause et son effet ont la même probabilité.

**Toutes les possibilités (les configurations microscopiques)
ont donc la même probabilité.**

On fait des calculs et ça marche !

- ▶ La température, l'énergie interne, la capacité calorifique... ont une interprétation microscopique.
- ▶ L'entropie aussi:

Cas général: $S = \text{Somme} [p \log(1/p)]$

Si p constant: $S = \log(1/p) = \log(\text{nombre de possibilités})$

**Si comprendre c'est faire des liens entre les choses,
alors le progrès est énorme.**

Paradoxe de récurrence de Poincaré et Zermelo (1/2)

- ▶ Si les probabilités sont des fréquences le système est récurrent.
- ▶ Ouvrez une bouteille de gaz.
Attendez... et le gaz reviendra dans la bouteille.



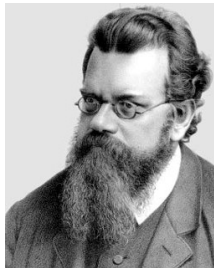
H. Poincaré
(1854-1912)



E. Zermelo
(1871-1953)

Paradoxe de récurrence de Poincaré et Zermelo (2/2)

- Point de vue usuel: le temps de récurrence est **très très long** et concrètement la récurrence jamais observée (plutôt platonicien).



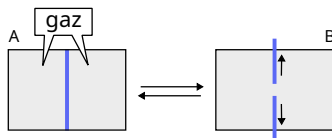
L. Boltzmann
(1844-1906)



C. Villani
(1973-)

- Mais la contradiction subsiste: **en mécanique statistique l'équilibre n'est pas un attracteur et le postuler est contradictoire avec la récurrence.**

Paradoxes de Gibbs (1/2): jonction



- **Thermodynamique:** la différence d'entropie est le travail minimum pour revenir à l'état initial.

$$S_B - S_A = 0$$

- **Mécanique statistique:** la différence d'entropie est la différence du log du nombre de possibilités.

$$S_B - S_A = N \times \log 2$$

Paradoxes de Gibbs (2/2): mélange

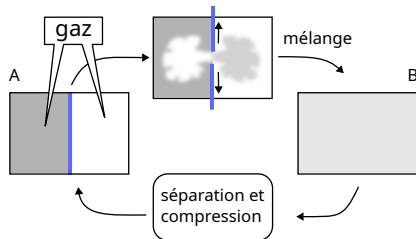
► **Thermodynamique:**

la différence d'entropie dépend d'une différence éventuelle entre les deux gaz.

► **Mécanique statistique:**

la différence d'entropie est toujours

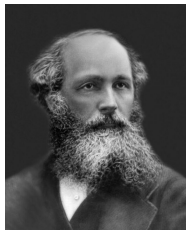
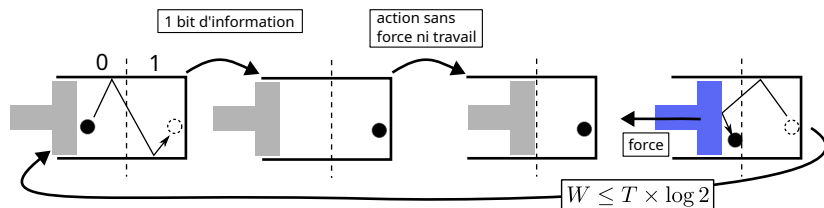
$$S_B - S_A = N \times \log 2$$



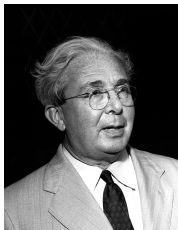
Question: si les deux gaz sont constitués d'isotopes différents, la différence d'entropie est-elle la même avant et après leur découverte par F. Soddy en 1913?

En mécanique statistique où est passée l'information?

Or l'information est de l'énergie: la preuve par les démons



J.C. Maxwell
(1831-1879)



L. Szilard
(1898-1964)

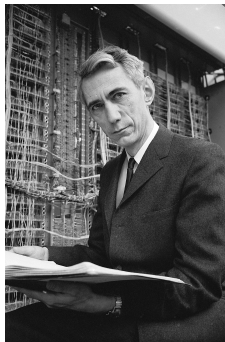
- En sachant où est la particule, le démon (ou l'ordinateur) peut recueillir un travail mécanique.

Pause

Théorie de l'information:
la balle est dans le camp des ordinateurs

Optimiser la transmission et le stockage des messages...

- Pour Shannon, chaque caractère émis est un évènement aléatoire.
- Comment optimiser (minimiser) l'espace de stockage à prévoir?



C. Shannon
(1916-2001)

...c'est optimiser l'encodage des caractères

1. Établir une table de correspondance:

$a \mapsto 0$
 $b \mapsto 1$
 $c \mapsto 2$
 ...

2. Chercher la table et la règle d'encodage conduisant en moyenne au plus petit nombre de bits H par caractère.

pas optimum:	meilleur:
00010001	10001
00000001	1
00000101	101

Les deux résultats mathématiques de Shannon

1. En aucun cas le nombre de bits par caractère (par évènement) ne pourra être plus petit que:

$$H = \text{Somme } [p \log_2(1/p)]$$

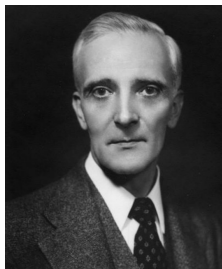
H est appelée **quantité d'information** émise par la source.

$S = H \times \log 2$ est son entropie.

-
2. H (et donc l'entropie S) est la seule mesure possible de l'incertitude concernant le prochain caractère émis, le prochain évènement, ou **la prochaine configuration microscopique d'un système**.

Implications en mécanique statistique

1. Principe de néguentropie de l'information



L. Brillouin
(1889-1969)

2. Principe du Maximum d'entropie



E.T. Jaynes
(1922-1998)

Principe de néguentropie

1. **Clausius**: la différence d'entropie est l'opposé du travail minimum fourni.
2. **Gibbs**: l'entropie est le logarithme du nombre de possibilités offertes au système.
3. **Shannon**: la formule de Gibbs pour l'entropie est finalement celle de l'incertitude sur l'état microscopique du système.

Donc

4. **Brillouin**: réduire l'incertitude (en acquérant de l'information) requiert un travail minimum.

Les paradoxes liés aux mélanges et aux démons sont résolus!

Principe du maximum d'entropie

Tenir compte de toute l'information disponible...
mais pas plus. C'est maximiser l'incertitude.



1) Théorème mathématique (Shannon):

- ▶ Maximiser l'incertitude c'est maximiser l'entropie.
Et lorsqu'on ne sait rien l'entropie maximale est celle d'une probabilité uniforme.

Plus besoin de l'hypothèse ergodique.

2) Principe physique (Jaynes):

- ▶ L'équilibre est l'état macroscopique qui maximise l'entropie des configurations microscopiques.

Avec le 2nd principe, l'équilibre devient un attracteur.

Une question dérangeante

Pour un dualiste platonicien:

- Pourquoi un système thermodynamique (un objet) devrait-il maximiser l'incertitude (son entropie) que nous (sujets) avons le concernant? Ce serait une inversion des rôles!
-

Réponse de la théorie de l'information:

- La seule connaissance que nous ayons d'un système est celle donnée par l'observation qui nous permet de nous en faire une représentation.
- C'est **notre représentation rationnelle du système qui doit maximiser l'entropie (l'incertitude).**

Levée de bouclier des platoniciens

*“[Cette approche utilisant la théorie de l'information] est **associée à une position philosophique** dans laquelle la mécanique statistique est considérée comme une forme d'inférence statistique plutôt que comme **une description de la réalité physique objective.**”* O. Penrose, *Reports on Progress in Physics* (1979), 42, p.1937

*“Une telle vision, si elle est valable, créerait **de profonds problèmes philosophiques et tendrait à saper l'objectivité de l'entreprise scientifique.**”* K. Denbigh & J. Denbigh, *Entropy in Relation to Incomplete Knowledge* (1985) Cambridge University Press

*“C'est une approche **mathématiquement irréprochable, mais il faut être prêt à accepter la nature anthropomorphique de l'entropie.**”*
D.A. Lavis, *Frontiers in Fundamental Physics*, (2007) vol.3

Effacement de Landauer:
la bouée de sauvetage des platoniciens

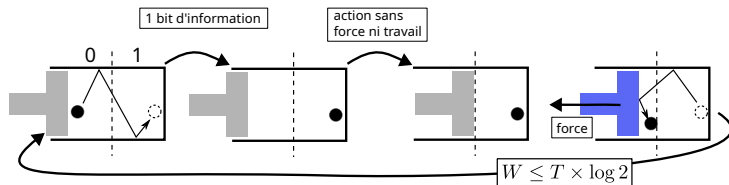
“L’information est physique” (R. Landauer)

“L’information n’est pas une entité abstraite et désincarnée; elle est toujours liée à une représentation physique. Elle est représentée par une gravure sur une tablette de pierre, une rotation, une charge, un trou dans une carte perforée, une marque sur du papier, ou tout autre équivalent.”



R. Landauer
(1927-1999)

L'argumentation de Landauer



- **Brillouin:** l'**acquisition** d'une information requiert un travail minimum

$$W_{\text{acquisition par bit}} \geq T \times \log 2$$

dépensé quelque part dans la procédure.

- **Landauer:**

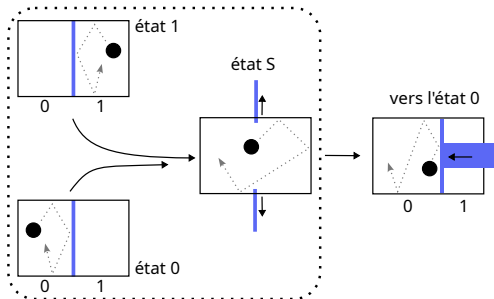
1. une acquisition cyclique requiert l'effacement des données précédentes.
2. l'**effacement** d'un bit d'information requiert un travail minimum

$$W_{\text{effacement par bit}} \geq T \times \log 2$$

la dépense est localisée

La procédure d'effacement de Landauer

- Effacer un bit c'est mettre sa valeur à 0 selon une procédure qui doit fonctionner même si la valeur est inconnue



- D'où un travail minimum $W_{\text{mini}} = T \times \log 2$ non nul pour effacer un bit.

Ce que cela implique

- ▶ Une limite finie physique à la puissance des ordinateurs (dont l'AI).

“L'irréversibilité logique [de l'effacement] implique à son tour l'irréversibilité physique [thermodynamique]” (R. Landauer, 1961)

- ▶ **L'information devient un objet platonicien.**

Le plus petit élément d'information (un quantum d'information) est matérialisé sous la forme d'un bit de donnée (un objet).

Son acquisition a un coût lié à son effacement préalable.

Pause

Réfutation du "principe" de Landauer

1ère erreur: irréversibilité thermodynamique et logique

- ▶ L'irréversibilité thermodynamique:

C'est une propriété du chemin suivi.

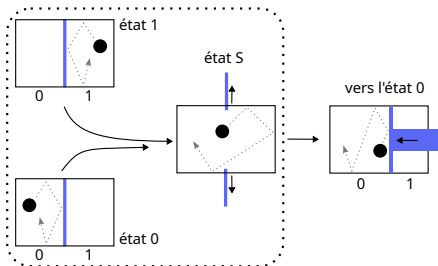
- ▶ L'irréversibilité logique est une propriété liée à la perte d'information entre les états initial et final.

Ce n'est pas une propriété du chemin suivi.

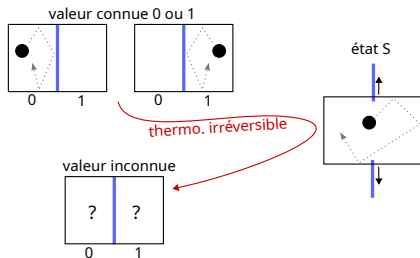
2ème erreur: valeur connue et inconnue

- L'irréversibilité thermodynamique est jugée selon l'information partielle (incomplète) que l'on a.

La conception de Landauer



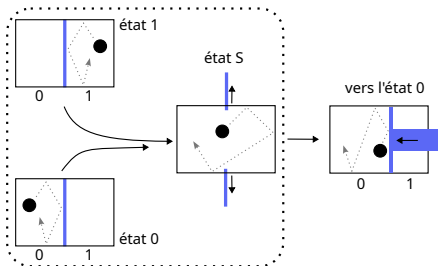
Celle de la thermodynamique



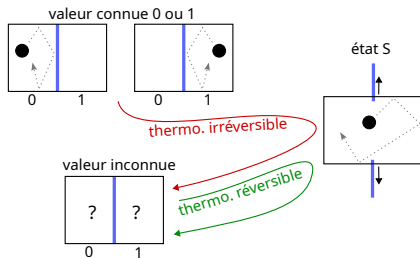
2ème erreur: valeur connue et inconnue

- L'irréversibilité thermodynamique est jugée selon l'information partielle (incomplète) que l'on a.

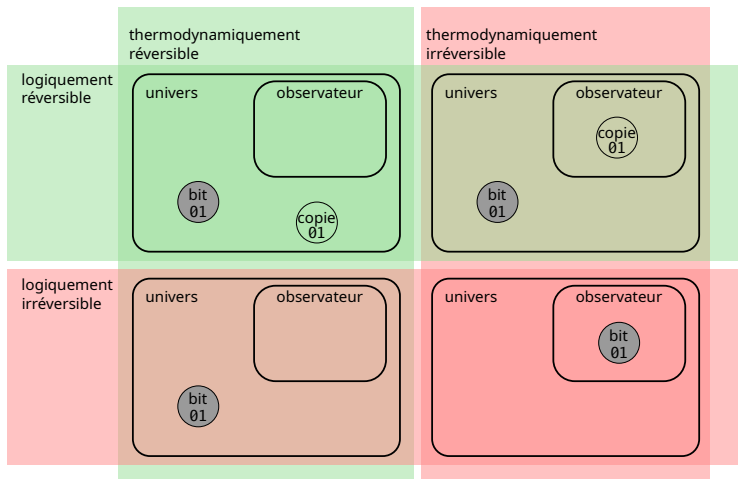
La conception de Landauer



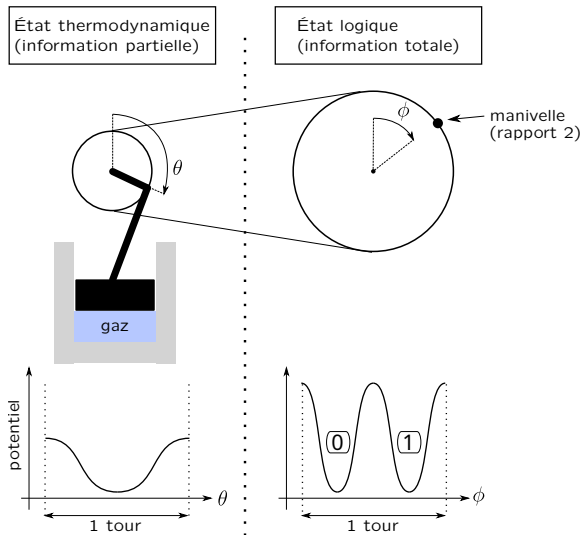
Celle de la thermodynamique



Effaceur de Landauer



Autre incarnation



Enfin: bit d'information et bit de donnée

Ne pas confondre l'information et son "incarnation"

- ▶ La même information peut être incarnée de différentes manières: l'incarnation change, mais l'information non.
- ▶ L'information doit être incarnée, mais un bit de donnée l'est déjà.
- ▶ Une information ne peut pas se donner deux fois, mais un bit de donnée peut être dupliqué.
- ▶ Un bit de donnée peut être effacé, mais l'information correspondante ne l'est que si aucune copie n'existe.

L'information est un concept (comme l'énergie).

Il n'existe pas d'objet matériel correspondant à un bit d'information (tout comme il n'existe pas de particule d'énergie).

Conclusion

Les “*lois de la nature*” sont celles auxquelles notre représentation rationnelle de la nature doit obéir.

