

Deux siècles après le principe de Carnot, de quoi l'IA n'est-elle que la manifestation remarquable?

Vincent Mazauric

Journée de la Chaire MPDD -- SE

Le Hive, 8 octobre 2025

Nexus Energie vs. Information... (trilemne avec les matériaux!)

Des approches conservatives au rôle de l'information dans l'évolution

Approches actuelles:

- Limites planétaires... dans un Univers en expansion!
- Prévalence du **Premier Principe**:
« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se conserve! »
interprété/appliqué de manière excessive (voire exhaustive!)
- Arbitrage entre:
énergie domestiquée – matériaux – pertes et dommages
- Le **Second Principe** est passé dans « pertes et dommages »
alors qu'il établit le lien entre:
 - Évolution (flèche de temps)
 - L'information, la connaissance et l'entropie
 - La dégradation de l'énergie en chaleur
- La digitalisation est un moyen au service de la soutenabilité

Limites:

1. Problème mal-conditionné:
 - L'énergie domestiquée représente 10^{-4} du flux d'énergie traversant la Terre
2. Plus d'écoulement du temps:
 - si l'entropie croît dans un monde borné
3. Les approches quantitatives prévalent (LCA, IAM...) alors que le caractère systémique d'une transition impose d'abord une description qualitative



1

Le second principe

2

La machine climatique

3

Du second Principe au MEPP

4

Les transitions dans l'évolution

5

La soutenabilité

6

Augmenter la production d'information

7

Conclusion

Life Is On

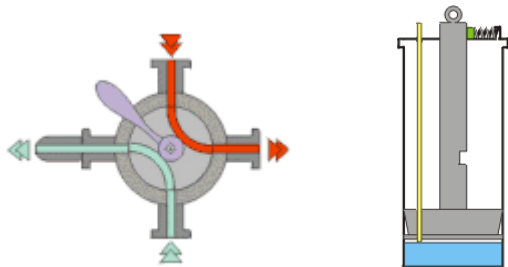
Schneider
Electric

Le 2nd principe de la thermodynamique... dédié au GPT!

Le seul principe de physique jamais invalidé par l'expérience (à ce jour...)

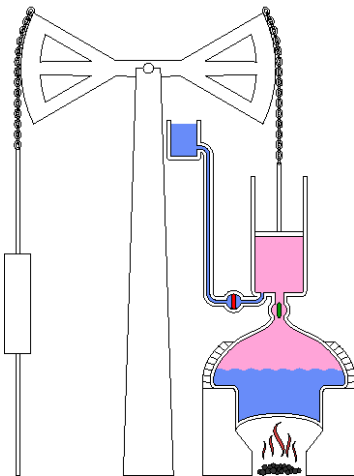
Les « briques » de Denis Papin

- Robinet à 4 voies (1685)
- Piston (1690)



<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e4/4vanim2.gif/225px-4vanim2.gif>
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Denis_Papin_piston_anim.gif

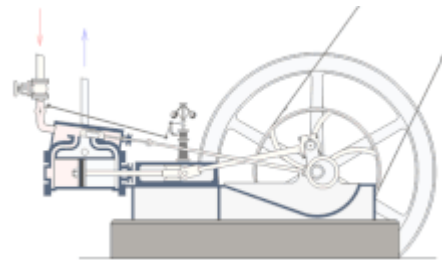
La Machine de Newcomen (1712)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newcomen_atmospheric_engine_animation.gif?uselang=fr

La machine de Watt (1769)

- Régulateur à boules, Tiroir
- Fiabilité
- ➔ début de la révolution industrielle
- ➔ Effet rebond (Jevons, 1865)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steam_engine_in_action.gif?uselang=fr

Le « théorème » de Carnot (1824)

Ce qui est établi ou intuité :

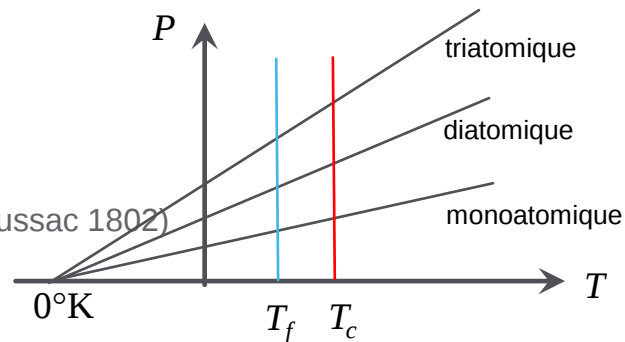
- La notion de gaz balistique 'élastique' dont toute l'agitation se transmet au piston
- Croissance linéaire de la pression avec la température à volume constant (Gay-Lussac 1802)
- Existence d'une température absolue (Amontons 1703)

Ce que suppose Carnot

- Cycle à 4 temps (2 adiabates, 2 isothermes) parcouru quasi-statiquement
- Tout le « calorique » Q se transforme en travail mécanique W pour une évolution quasi-statique: $W = Q_c - Q_f > 0$
- Le cycle est optimal, le gaz élastique est l'agent de conversion optimal (circuit fermé): $\rho = \frac{W}{Q_c} < \rho_{\max} < 1$

Ce que démontre Carnot:

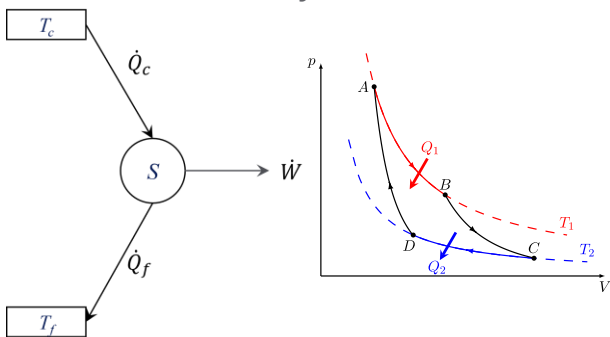
- Rendement optimal pour un gaz parfait:
- Inégalité de Clausius pour un cycle ditherme:



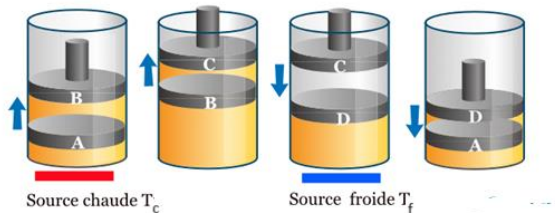
$$\rho_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{Q_f}{T_f} > 0$$

Cycle

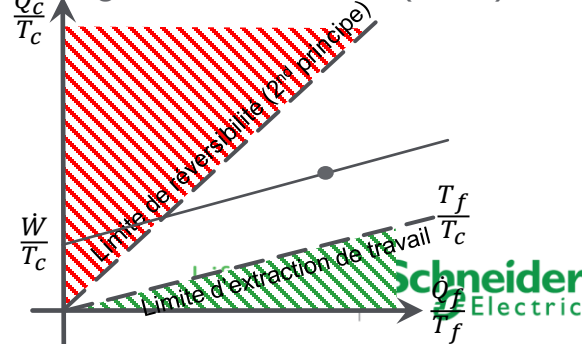


Machine



Public

Inégalité de Clausius (1862)



De théorème de Carnot au Second principe

Les concepts introduits par Carnot:

- Notion de cycle optimal
- Gaz parfait fermé comme agent optimal
- La conversion du calorique intuite le premier principe (Lagrange, 1870; Noether, 1915)
- Notion de thermostat et de réservoir (thermique) y compris en régime dynamique délivrant des flux (extensifs)

Ce qui aurait pu être prolongé:

- **Information:** le cycle procure une mesure de la flèche du temps donc une information (payée par l'inégalité de Clausius)
- **Comportement universel:** abstraction des sources thermiques et de l'agent (dans le cas idéal)
- **Variable d'état:** pilotage par des variables intensives

Enoncé de Clausius (1850):

- Définition de l'entropie

Enoncé de Thomson/Kelvin (1852)

Enoncé de Boltzmann (1872):

- Interprétation probabiliste au niveau particulaire
- **Croissance de l'entropie de tout système isolé**

Unification de Gibbs (1873):

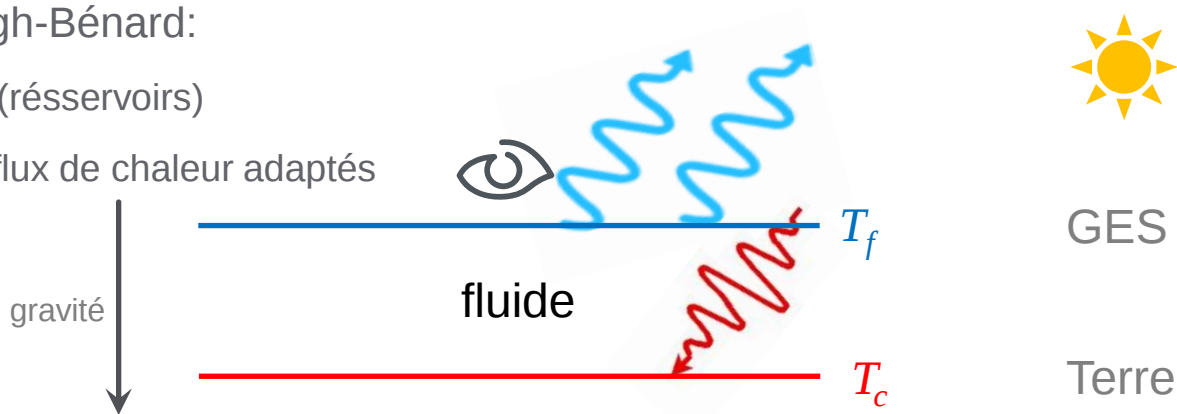
- Ensembles canoniques
- Expression probabiliste de l'entropie

La machine climatique

Motive les travaux de Carnot dès l'introduction de son ouvrage sur les « machines à feu »

Expérience de Raleigh-Bénard:

- T_f et T_c sont fixées (réservoirs)
- Q_f and Q_c sont des flux de chaleur adaptés



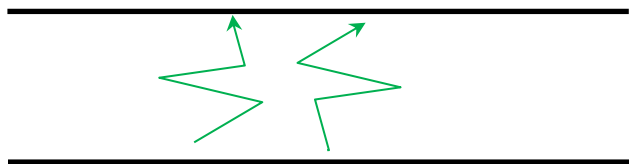
« Physics in the kitchen »:



La machine climatique pour les “nuls”: sans nuit, ni saison!

Le transfert de chaleur est optimisé par la convection

Diffusion: transfert de proche en proche

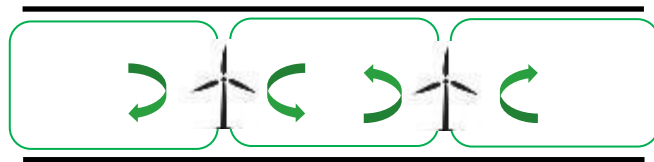


T_f

T_c



Convection: travail macroscopique produit



2nd principe: $\frac{Q_f}{T_f} - \frac{Q_c}{T_c} > 0$

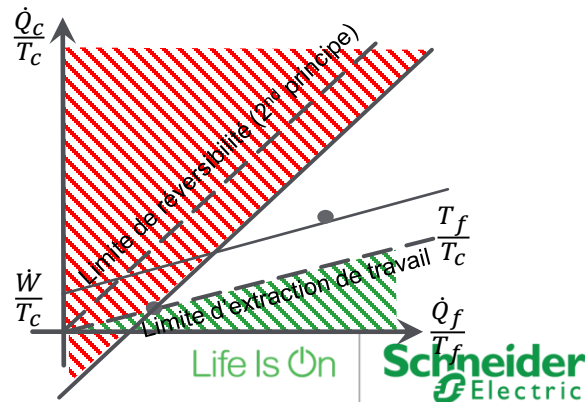
R. Clausius, 1865

$$\frac{Q_f}{T_f} - \frac{Q_c}{T_c} > 0$$

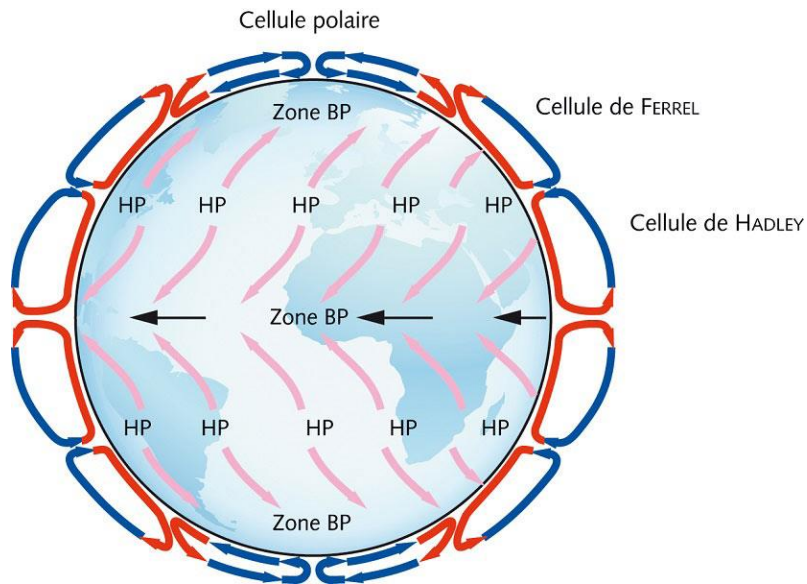
Raleigh (1916) - Bénard (1901)

Le seuil du régime de convection depend de:

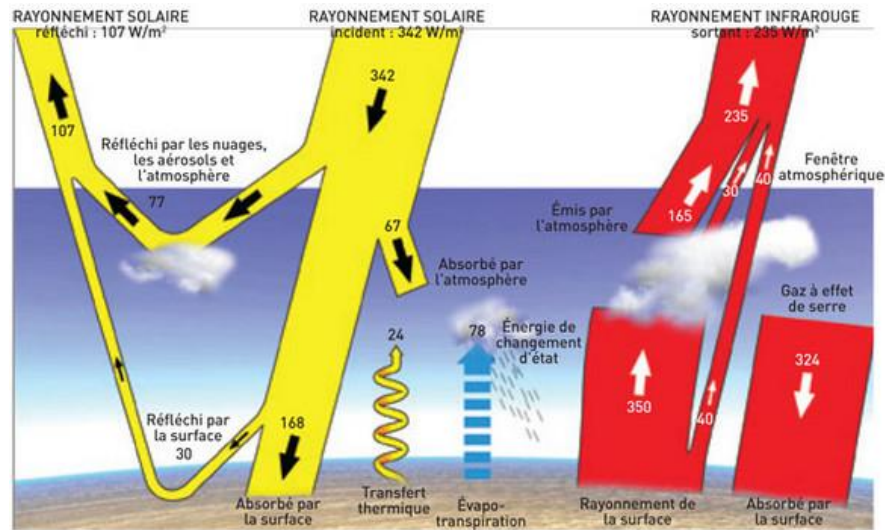
- viscosité
- La qualité des surface d'échange
- L'écart de température
- L'épaisseur de la couche
- La capacité calorifique et la conductivité thermique du fluide
- (...)



Avec les alternances jour/nuit et les saisons



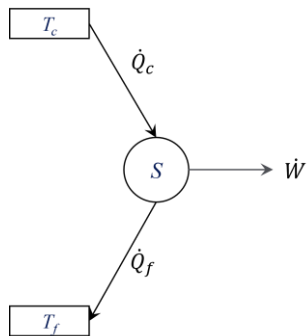
J.6L. Béquignon, J.-L. Guéry; La navigation hauturière (2014)



<https://www.cea.fr/comprendre/PublishingImages/Pages/climat-environnement/complements-climat/flux-energie-systeme-climatique/flux-d-energie-au-sein-du-systeme-climatique.jpg>

Du 2nd Principe au Principe de Production Maximal d'Entropie (MEPP)

Point de Vue de Carnot (1824):



- Moteur 4 temps:
2 isothermes, compression et détente adiabatiques
- Le travail extrait de la source chaude:

$$\dot{W} = \dot{Q}_c - \dot{Q}_f > 0$$

- est limité par l'irréversibilité:

$$\text{Entropy: } \frac{\dot{Q}_f}{T_f} - \frac{\dot{Q}_c}{T_c} > 0$$

Point de vue informationnel :

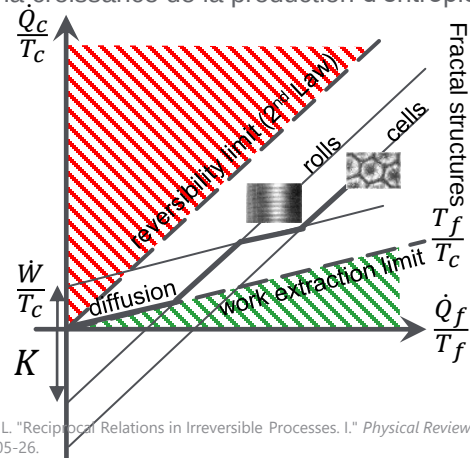


- Les cellules de convection correspondent à une situation plus ordonnée que la diffusion:
- ➔ Caractérisé par un **parametre d'ordre** (Landau, 1937)
- Identification/equivalence entre:
 - entropie physique (Boltzmann/Gibbs)
 - information manquante
 - entropie computationnelle (Shannon)
- La création d'ordre implique de dégager de l'entropie vers l'Univers (2nd principe)
 - ➔ Une énergie est nécessaire pour augmenter le degré d'ordre:
 - ➔ Fournie depuis une source chaude puis dégradée vers la source froide par un **processeur!**

Brillouin, L. *Science and Information Theory*. New York, USA: Academic Press, 1956.
 Shannon, C.E. "A Mathematical Theory of Communication." *The Bell System Technical Journal* 27 (1948): 379-423.
 Jaynes, E.T. "Information Theory and Statistical Mechanics." *Physical Review* 106, no.4: 620-30; 108, no.2: 171-90 (1957).
 Landau L. "On the theory of phase transitions," *Zh.Eksp.Teor.Fiz.* 7(1937): 19-32.

Point de vue évolutionniste

- Maintenir un état ordonné hors-d'équilibre nécessite une production d'entropie
- La production d'entropie ne peut qu'**augmenter** avec le temps ($\frac{dK}{dt} \geq 0$)
- Les îlots ordonnés dans un Univers en expansion qui se désordonne pourvoient à la croissance de la production d'entropie



Onsager, L. "Reciprocal Relations in Irreversible Processes. I." *Physical Review* 37, no. 4 (1931): 405-26.
 Prigogine, I. "Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes." Springfield, USA: Charles C Thomas Publisher, 1967.
 Lotka, A. J. "Contribution to the Biogenes of Evolution." *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, no. 6 (1922): 147-51; "Natural Selection as a Physical Principle." *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, no. 6 (1922): 151-4.

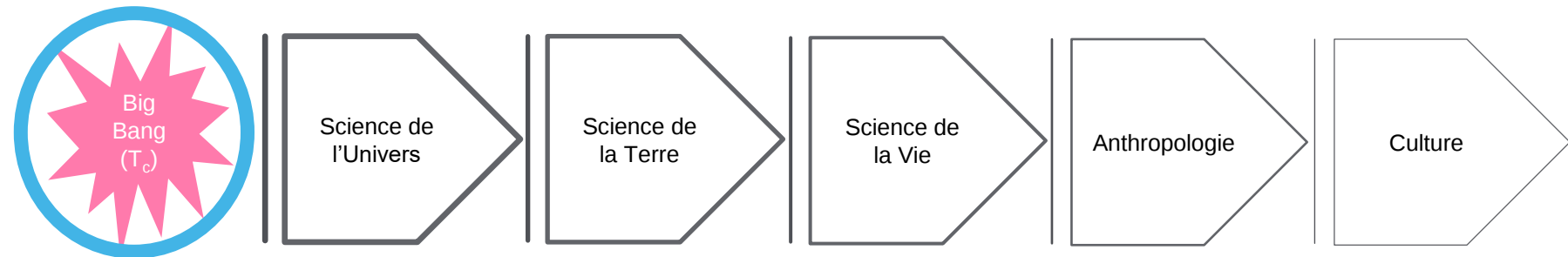
Production d'Entropie & d'Information maximales vs. Evolution

Une sélection parmi les sciences de l'Univers, de la Terre et de la Vie

Type	reference	Evidence	
Universe Science	Chaisson, E. J. "The Natural Science Underlying Big History." <i>Scientific World Journal</i> (2014): 384912.	Energy rate density is an objective metric suitable to gauge relative degrees of complexity among a hierarchy of widely assorted systems observed throughout the material Universe.	
Earth Science	Bejan, A., and S. Lorente. "The Constructal Law of Design and Evolution in Nature." <i>Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci</i> 365, no. 1545 (2010): 1335-47.	Overview of the so-called constructal law, as a possibly complementary approach to understand how optimized structures develop, such as the organization of river systems or blood vessels in living organisms.	
Life Science	Dewar R. "Maximum Entropy Production and Plant Optimization Theories." <i>Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci</i> 365, no. 1545 (2010): 1429-35.	Maximizing long-term entropy production rather than instantaneous allows biological systems to outperform abiotic processes. 'Survival of the likeliest' depends on spatio-temporal averaging.	

Les transitions d'ordre dans l'évolution cosmologique (connue)

Initiation puis accumulation dans les phases de transition



Interactions:

- Forte (fission)
- Électromagnétique
- Faible (fusion)
- Gravitationnelle (2nd ordre)

VS.

Croissance de
(la production de)
l'entropie
(1^{er} ordre)

Confidential Property of S

14Mds a.

Particules
Plasma

Atomes

Galaxies

Système solaire

Solidification des
planètes

Terre
(géologique)

Climat
solide/gaz, rotation, révolution

Vie végétale

Vie animale

Sociétés

Histoire

Sociologie

Sciences &
Techniques

Economie

Expansion de l'Univers

5

4

Public

0,3

Life Is On

0

Schneider
Electric

La soutenabilité

“ . . . the general struggle for existence of animate beings is not a struggle for raw materials—these, for organisms, are air, water and soil, all abundantly available, nor for energy which exists in plenty in any body in the form of heat, but a struggle for entropy, which becomes available through the transition of energy from the hot sun to the cold Earth.”

Boltzmann, L. “Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.” Almanach der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften 36 (1886): 225–259. Also quoted in: Schrödinger, E. “What is life? The physical aspect of the living cell”. Cambridge, UK: Cambridge University Press (1944).

Diagramme entropique

Adaptation vs. Transition; décroissance de la génération d'entropie

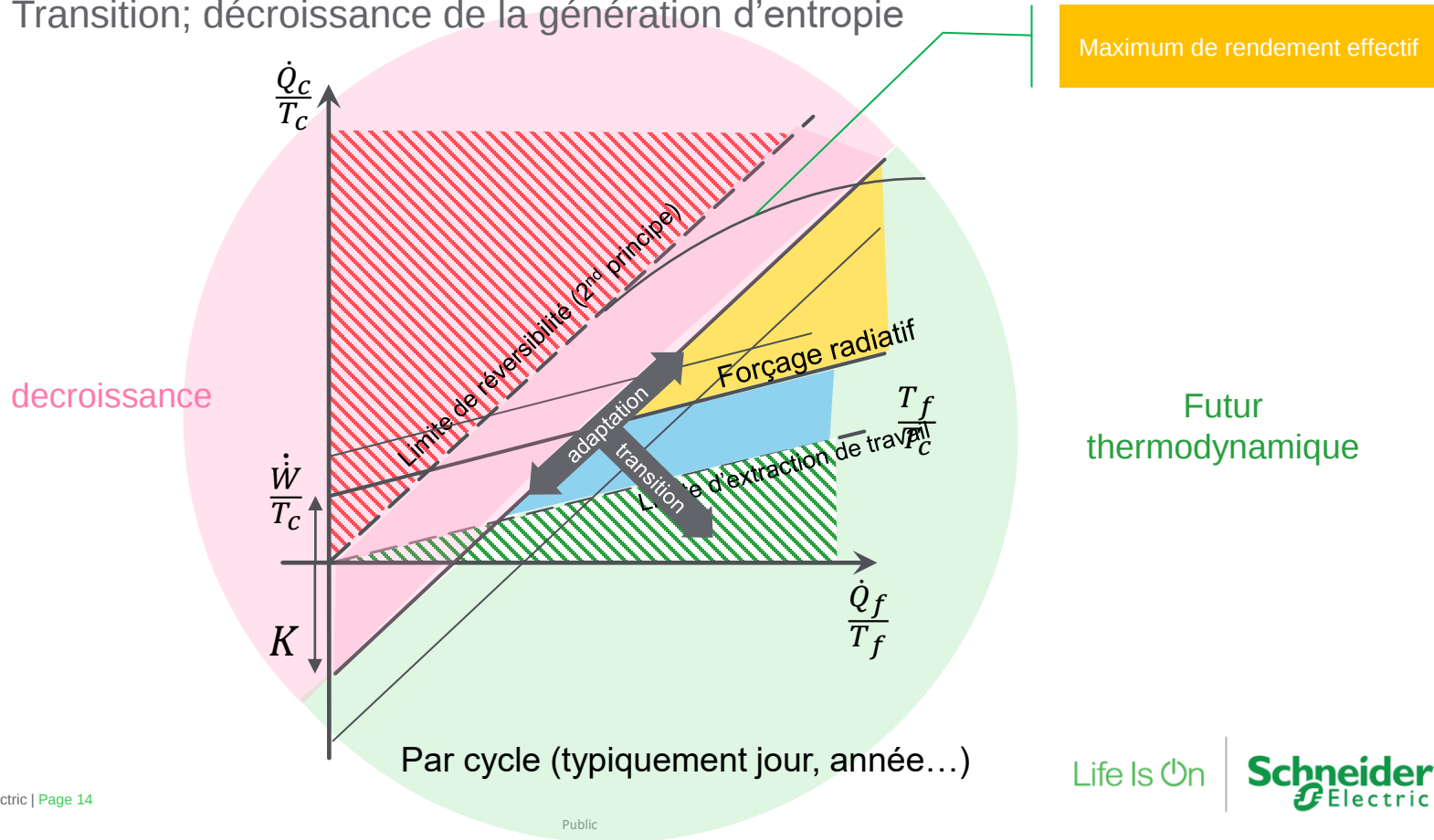
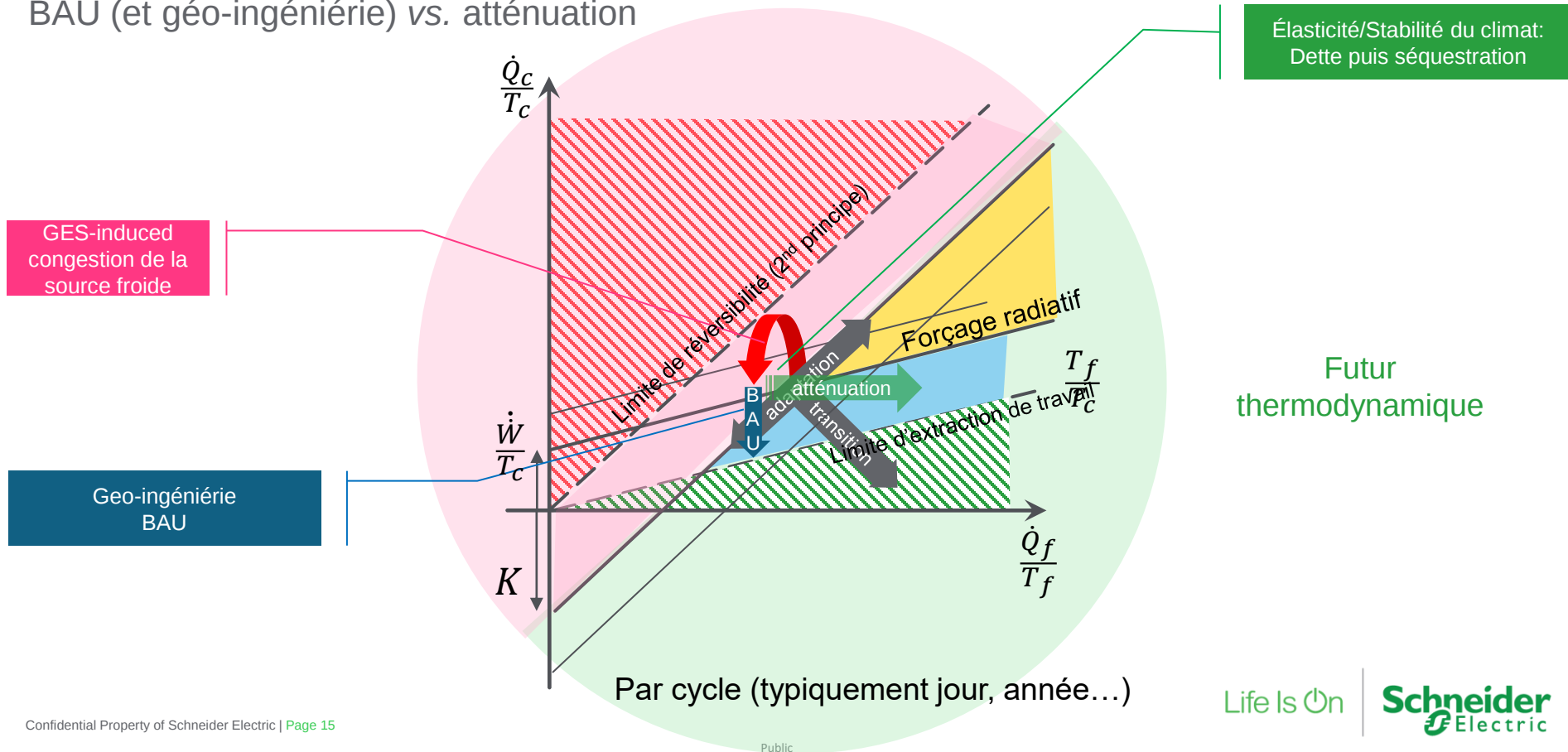
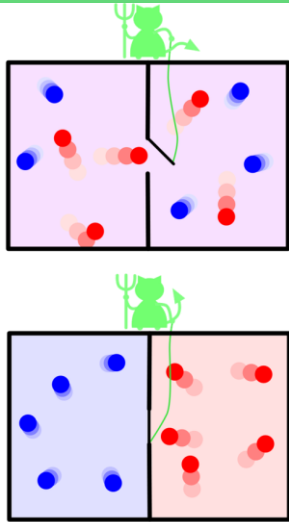


Diagramme entropique: les options face au CC

BAU (et géo-ingénierie) vs. atténuation

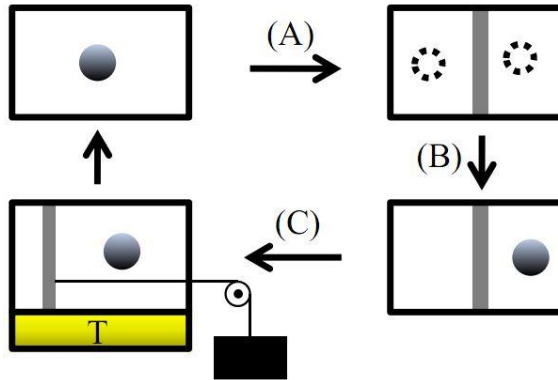


Augmenter la production d'information...grâce à l'IA!



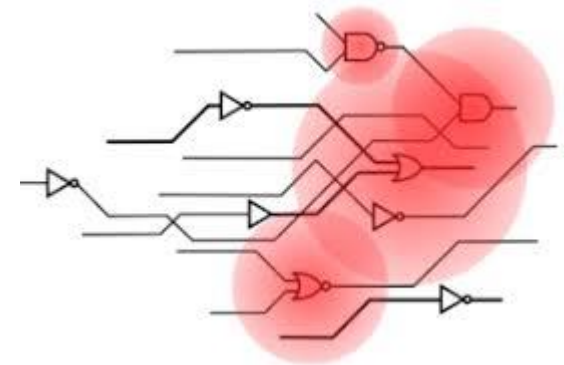
Maxwell's demon (1867)

L. Brillouin: Maxwell's Demon Cannot Operate: Information and Entropy, Journal of Applied Physics, vol. 22, 1951, p. 334-337



Szillard's engine (1928)

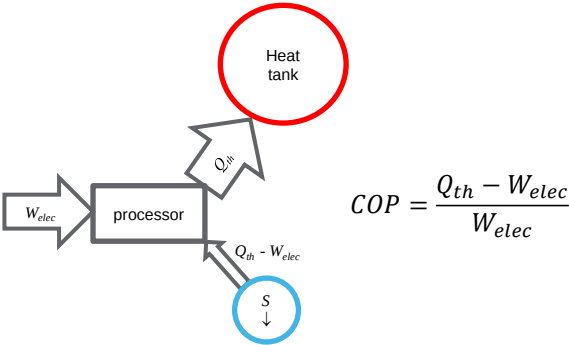
L. Szillard: Über die entropieverminderung in einem tehermodynamischen system bei eingriffen intelligenter wesn, Zeitschrift für Physik 53, 840 (1929)



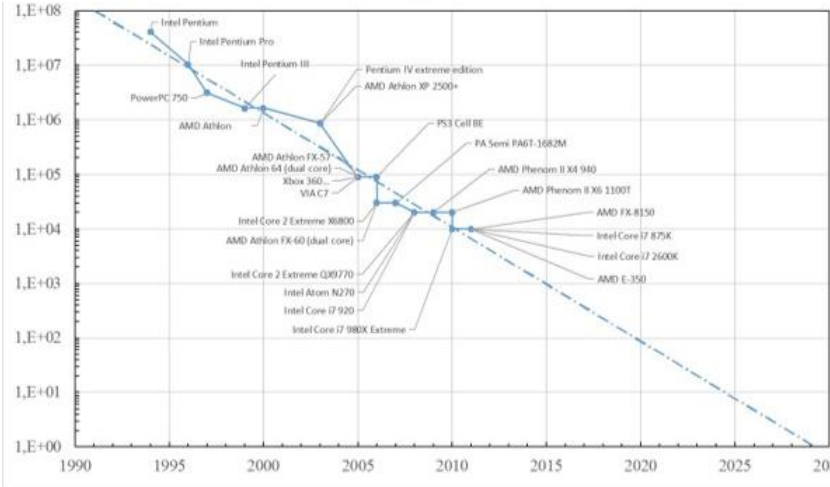
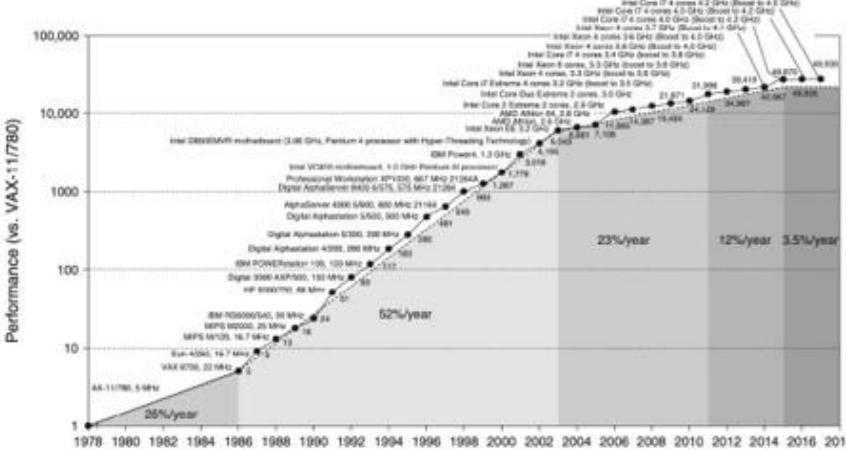
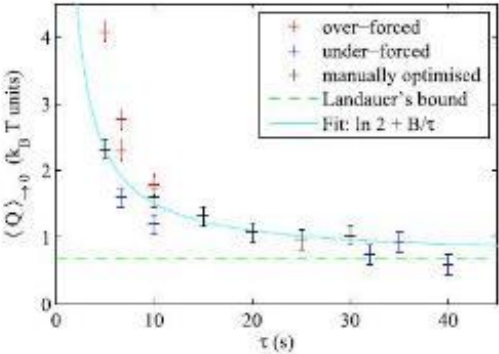
Landauer's erasure principle (1961)

R. Landauer: Irreversibility and heat generation in the computing process, IBM Journal of Research and Development, 5 (3) pp. 261-269 (1961).

Preuve expérimentale du principe de Landauer (1961)



A. Berut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, E. Lutz: Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics, Nature, 483, pp. 187-192, 2012

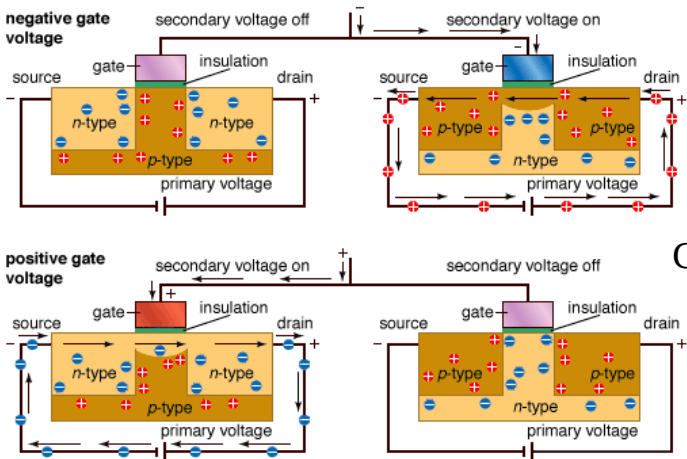


Briques de structures logiques

Etat de l'art “sur étagère”

Combinatory MOS Field Effect Transistor (μm):

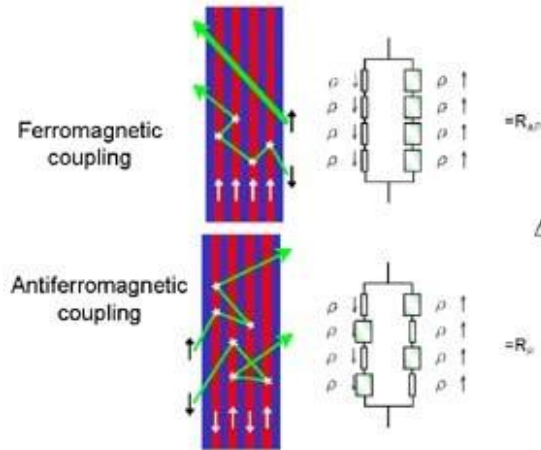
- La tension de grille (2V) agit sur le canal pour l'enrichir ou l'appauvrir en porteurs libres
- Le courant éventuel traversant le canal permet de discriminer l'état logique
- Énergie de commutation: $40,000 k_B T$ (pertes dynamiques)
- Pertes statiques: courants de fuite (polarisation)



$$\text{CoP} \approx 10^{-6} - 10^{-5}$$

Magnéto-Résistance Géante (nm):

- Un champ magnétique externe polarise sur une structure multicouche antiferromagnétique (au repos)
- La diffusion des électrons sur la structure multicouche dépend du spin permet de discriminer l'état logique
- Energie de commutation typique: $20 k_B T$ (pertes dynamiques)



$$\Delta R = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}$$

$$\text{CoP} \approx 10^{-3} - 10^{-2}$$

N. Gershenfeld: Signal entropy and the thermodynamics of computation, IBM Systems Journal, 35, (3&4), pp.577-586, 1996.

V.K. Joshi: Spintronics: a contemporary review of emerging electronics devices, Engineering Science and Technology, an International Journal ,19, pp. 1503–1513 (2016).

Semiconductor Industry Association/Semiconductor Research Corporation (SIA/SRC) : “Rebooting the IT revolution” (Sept. 2015): <https://www.semiconductors.org/resources/rebooting-the-it-revolution-a-call-to-action-2/> .

Quelques perspectives de long-terme

La soutenabilité de la digitalisation:

- paraît très limitée en technologie CMOS;
- dépend à moyen terme d'un découplage entre **écriture** et **lecture** des données (e.g., spintronics).

L'empreinte des technologies digitales:

- est « intriquée » avec celles de l'énergie et des matériaux (**energy/information/matter trilemma**)
- nécessite des exercices de planification à long terme, incluant les tensions sur les matériaux (<2050-70);
- Le **magnétisme** est la clé des technologies efficaces de l'**information** et de la **conversion de puissance**!

La **distribution de valeur** entre la donnée et l'énergie dépend (aussi/encore) de considérations physiques!

Etat de l'art:

- Entropie Physique (Boltzmann/Gibbs):
 - L'irréversibilité résulte d'une **transformation** en **temps fini**
 - La dissipation est imputée aux fluctuations de l'état macroscopique pour garantir l'équiprobabilité de ses micro-états.
 - Entropie computationnelle (Shannon):
 - L'irréversibilité est due à la perte de mémoire des inputs
 - La dissipation est liée aux polarisation des portes CMOS (50%) et leur effacement (50%)
- ➔ Passer du paradigme de Landauer's à celui de Bennett!

Logique adiabatique:

- Polarisation par des rampes
- « Rembobiner » le calcul pour récupérer les énergies d'effacement
- ➔ Compromis entre stockage mémoires et énergies d'effacement
- Compenser par une:

Parallelisation massive:

- ➔ Nécessite de nouvelles méthodes et compétences

Quantum Computing... and its thermodynamic limit!

- | | | |
|---|------|-------------|
| • Superposition (//) | with | qbit |
| • Intrication (« computing-in-memories ») | vs. | Von Neumann |
| • Réversibilité (« rembobinage ») | vs. | bruit |

C.H. Bennett: Logical reversibility of computation, IBM J. Res. Develop. 17(6), pp.525-532 (1973); Notes on the history of reversible computation, IBM J. Res. Develop. 32(1), pp.16-23 (1988).

W. Porod: The thermodynamic of computation: A contradiction, in: Energy limits in computation, C.S. Lent, et al. Eds. pp. 141-154, Springer (2019).

M. Konopik, T. Korten, E. Lutz and H. Linke: Fundamental energy cost of finite-time computing, <https://arxiv.org/abs/2101.07075>, (2021).

A. Auffèves: Optimiser la consommation énergétique des calculateurs quantiques: un défi interdisciplinaire, Reflets de la Physique, 69, 16-20 (2021)..

N. Margolus, L. Levitin : The maximum speed of dynamical evolution, Physica D120 (1998) 188-195



Conclusion

Conclusion

- La thermodynamique procure le cadre méthodologique interdisciplinaire de l'évolution entre:
 - Sciences de l'Univers, de la Terre et de la Vie
 - Théorie de Information
 - Sociologie, Economie (métabolisme) et Droit (régulation) des sociétés
- Energie/ressources & Information: Qui gouverne?
 - Biais implicites: Ressources limitées, conservation vs. Croissance de la production d'entropie
 - Analyse quantitative (ACV) vs. Evolution qualitative ($\frac{dK}{dt} \geq 0$)
 - Atténuation (système passif) vs. Adaptation (machine, accumulation, transition)
 - Le point de vue entropique réconcilie les contributions abiotiques et biotiques
- Critère d'évolution:
 - si $\frac{dK}{dt} < 0$ alors endogéniser plus d'externalités ou sinon suspicion de GreenWashing!
 - $\min\left(\frac{dK}{dt}\right) > 0$ fournit une définition quantitative à l'évolution la plus soutenable
 - Gérer le temps pour limiter la contribution irréversible du saut d'entropie (cible dynamique)
- Règle de sélection:

L'évolution d'un système couplé à l'Univers discrimine les "organisations" que ne satisfont pas à la minimisation de leur information manquante et au contraire favorisent celles qui réalisent une acquisition du maximum d'information pour une puissance (décarbonée) et des ressources données!

information
generation

decarbonated

Make the most of your energySM

with

Life Is On

Schneider
Electric

Life Is On

