

Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

L'énergie dans tous ses états

[Bernard Remaud](#)

bernard.remaud@univ-nantes.fr
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



[La chaîne YouTube](#)



[Le blog](#)

L'énergie dans tous ses états

Caractériser les formes d'énergie

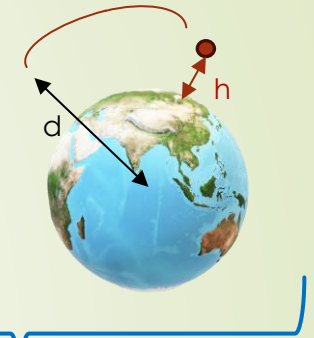
2026

Energie totale d'un système ?



Source RIN.CH

$$E_{\text{caillou}} = \underbrace{E_{\text{au repos}} + E_{\text{cinétique}}}_{m_0c^2 + 1/2m_0v^2} + \underbrace{E_{\text{gravitation}}}_{m_0gh}$$



Indétermination du point zéro
 $E_{\text{pot}} = -G \frac{M_T}{d} m_0$
 Toujours définie à une constante près

Et si le caillou se casse en vol
 Masse des molécules +
 énergie de liaison ?

La vitesse mesurée du sol ou par un drone

L'énergie totale absolue d'un système est difficile à déterminer
 – **et rarement utilisée**

Energie totale d'un système ?

La solution est donnée par la relativité $E = mc^2$

→ L'énergie totale d'un système est la mesure de son couplage à la gravitation

$$m = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right) \rightarrow \text{Cas particulier de } m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

C'est cette masse qui subira la gravitation

Par exemple

- Objet à la vitesse du son 340 m/s, $\frac{v}{c} \cong 1,1 \cdot 10^{-6} \rightarrow m \cong (1 + 0,6 \cdot 10^{-12})m_0$
- Muons au CERN $v = 0,98 c \rightarrow m \cong 7 m_0$
- Rayon cosmique record $3 \cdot 10^{14} \text{ MeV} \rightarrow v = (1 - 10^{-24})c \rightarrow m \sim 10^{24} m_0$

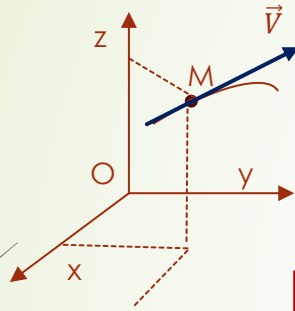
Dans l'infiniment petit, les énergies de cohésion contribuent à énormément l'énergie de masse :

1 proton = 3 quarks

Masse du proton $938,272 \text{ MeV}/c^2 \leftrightarrow$ masse des 3 quarks $8,8 \text{ MeV}/c^2$ (moins de 1%)

En pratique, les bilans d'énergie sont des bilans relatifs : variations entre la valeur initiale et la valeur finale

La vision classique de l'espace et du temps n'est pas générale



3 dimensions $\overline{OM} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix}$ et $\begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_z(t) \end{bmatrix} \Rightarrow$ 4 dimensions $\vec{V} = \begin{bmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}$

Distances $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$

Energie impulsion $\begin{bmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma m_0 c \\ \gamma m_0 v_x \\ \gamma m_0 v_y \\ \gamma m_0 v_z \end{bmatrix}$ avec facteur de Lorenz $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

La quantité indépendante du référentiel dans laquelle on l'évalue, est

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) = m_0 c^2$$

La rapidité φ est mieux adaptée que la vitesse (addition des rapidités)
Si v est petit $v = \varphi c$

$$\varphi = \text{artanh}\left(\frac{v}{c}\right) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}\right)$$

Comment qualifier les différents types d'énergie?

5

Critère 1 : Pérennité et qualité des sources

Stock ou flux
EROI

Critère 2 : Disponibilité, mobilité

Utiliser l'énergie efficacement là où sont les besoins.

Concentration
Distribution en réseau

Critère 3 : Utilisable efficacement

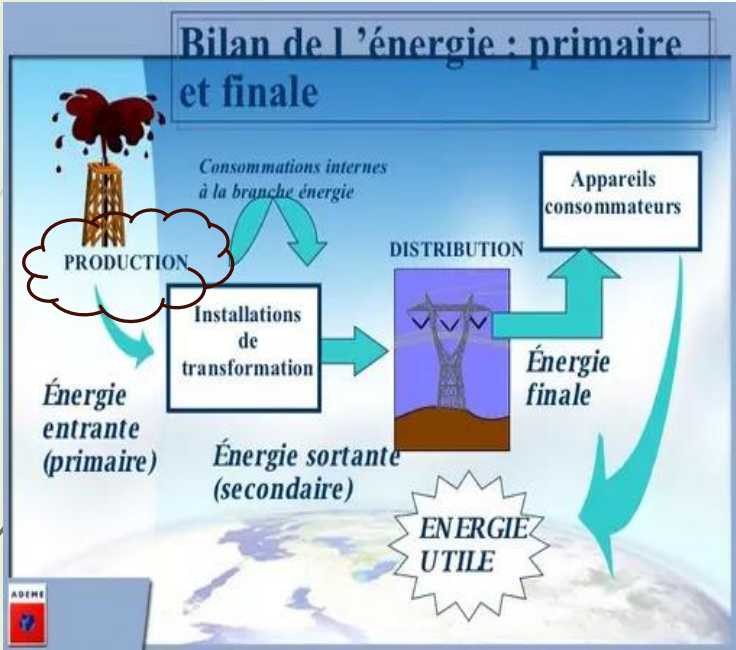
Pouvoir utiliser l'énergie de la source avec un rendement maximum

Entropie

Critère 3 bis : Utilisable efficacement

En minimisant l'impact sur l'environnement

Entropie



Source Slideshare

Pourquoi cette distinction entre énergie primaire et énergie utile ?

L'écart entre les deux symbolise toutes les pertes d'énergie engendrées par les actions de transformation nécessaires pour permettre l'utilisation de l'énergie primaire.

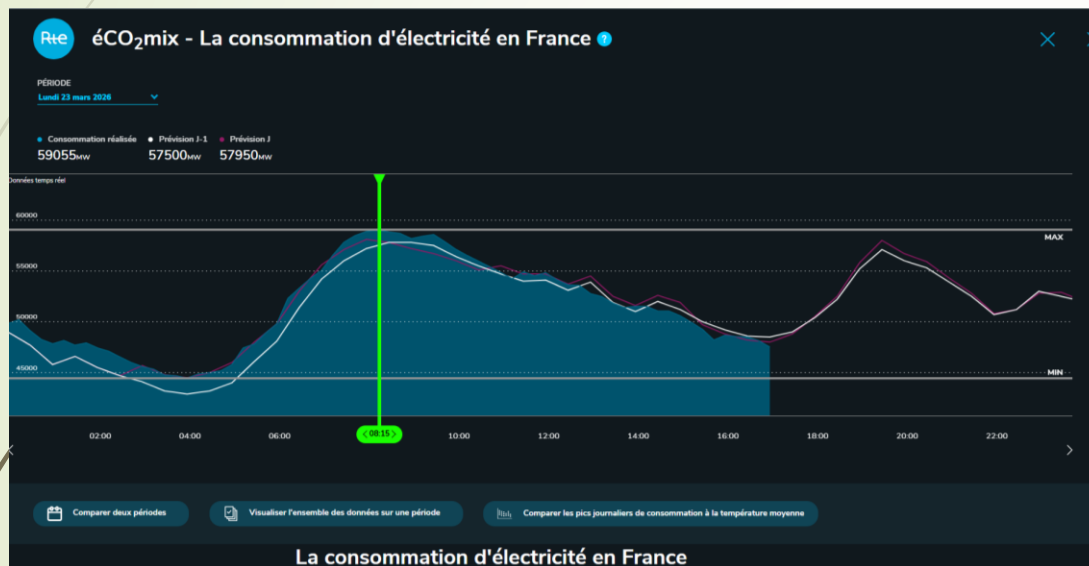
Ces pertes résultent notamment :

- De la transformation en énergie secondaire (opérations de production) ;
- Des actions de raffinage etc. ;
- Du transport de l'énergie ;
- Du stockage ;
- De la distribution de l'énergie aux clients finaux ;
- De la consommation d'énergie des équipements...

Source ENGIE

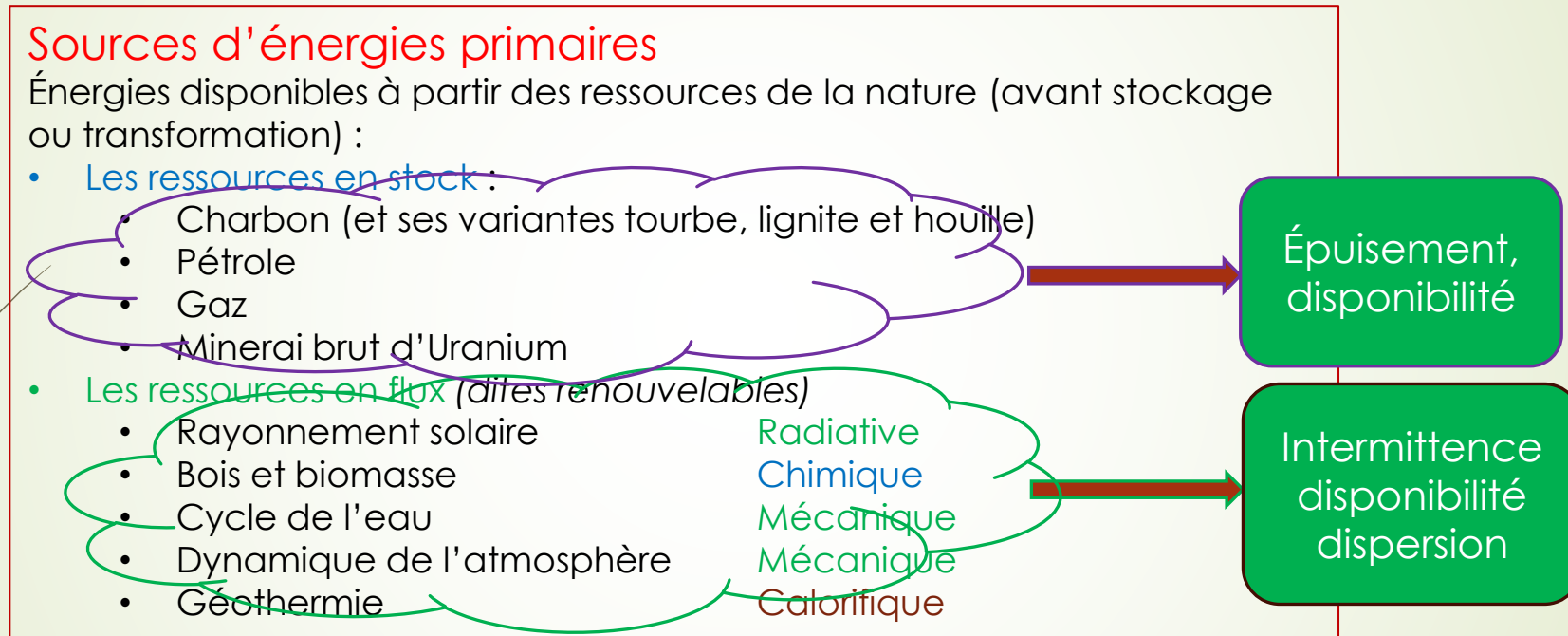
Ordres de grandeur :		
Énergie primaire 100 %	→	énergie secondaire 61%
		→
		énergie utile 35 %

Electricité : CO₂mix, les données temps réel



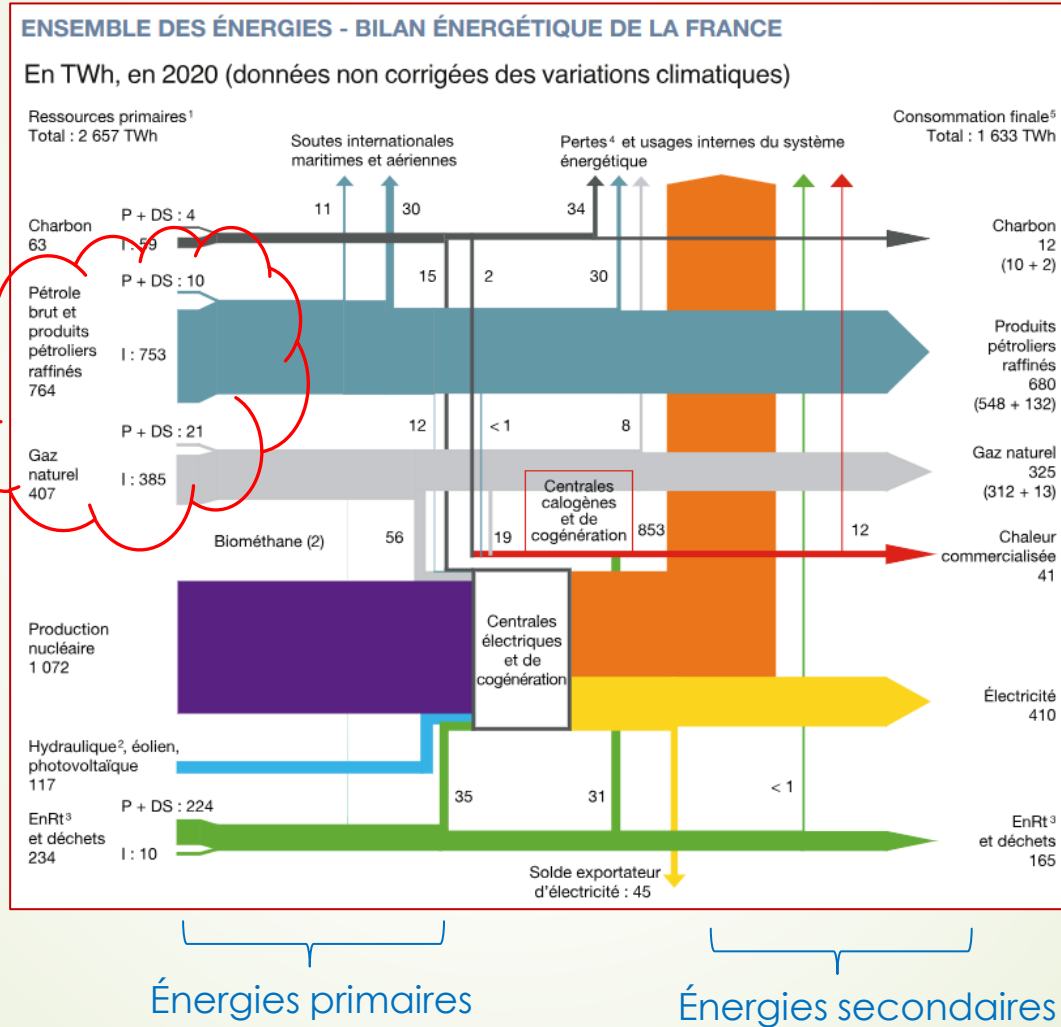
Energies : bp Energy Outlook (2025)

Pérennité et qualité des sources



De l'énergie primaire à l'énergie secondaire en France

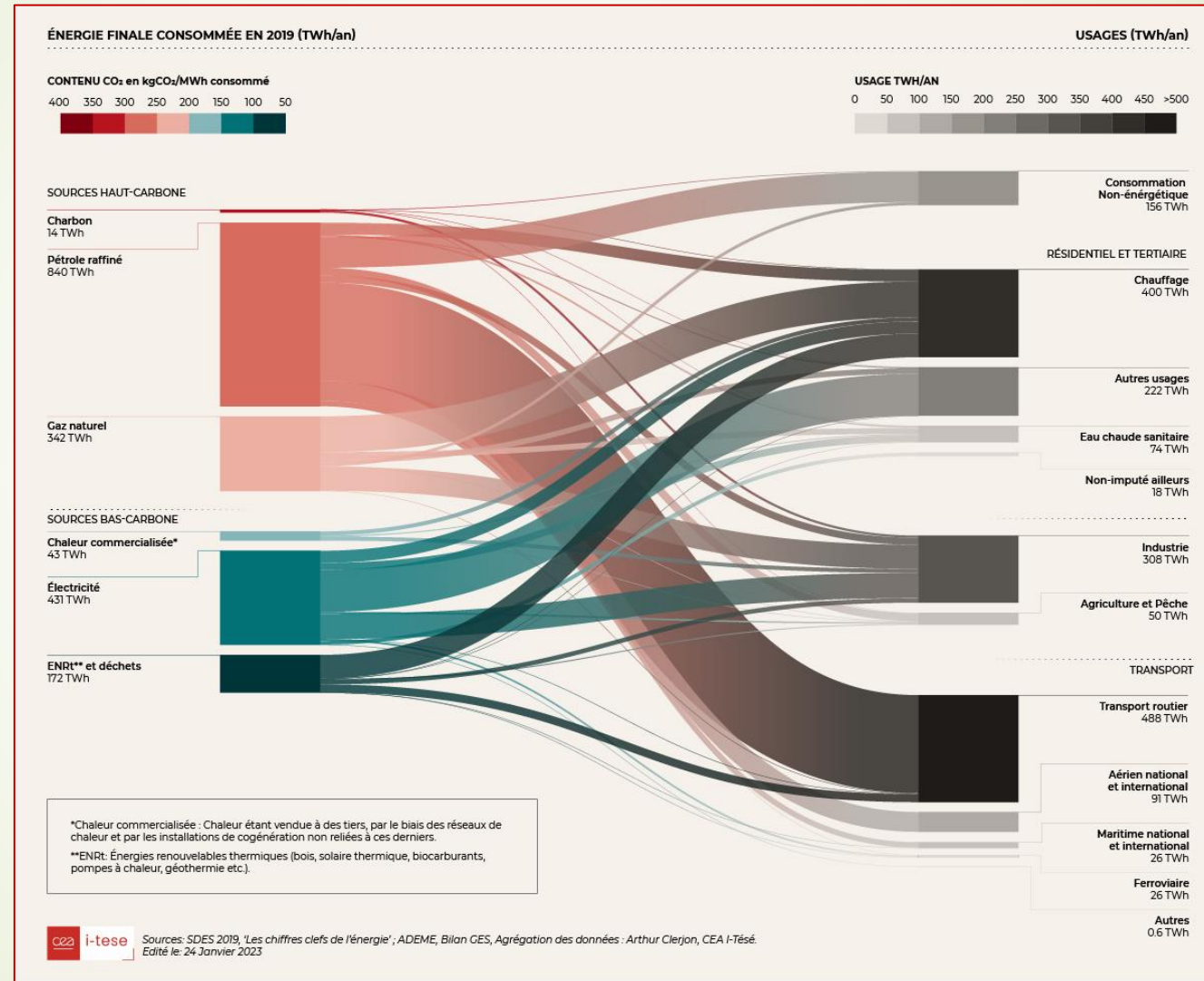
10



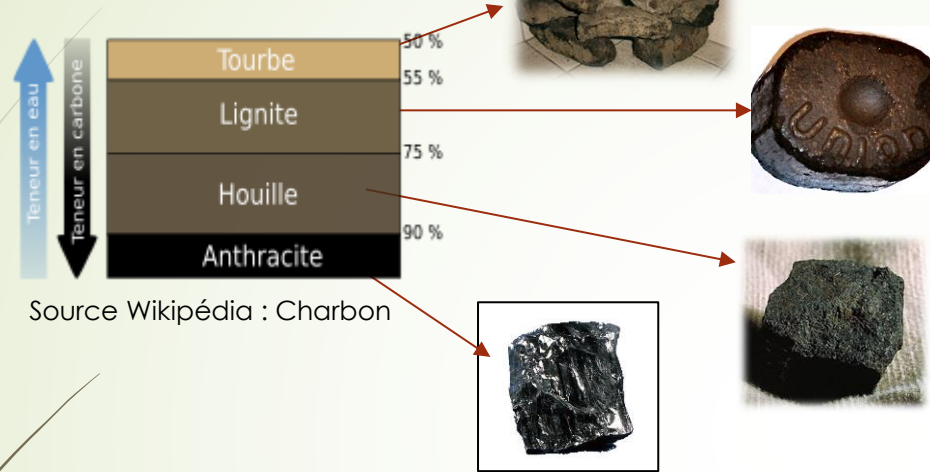
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

De l'énergie secondaire aux usages (France 2019)

11

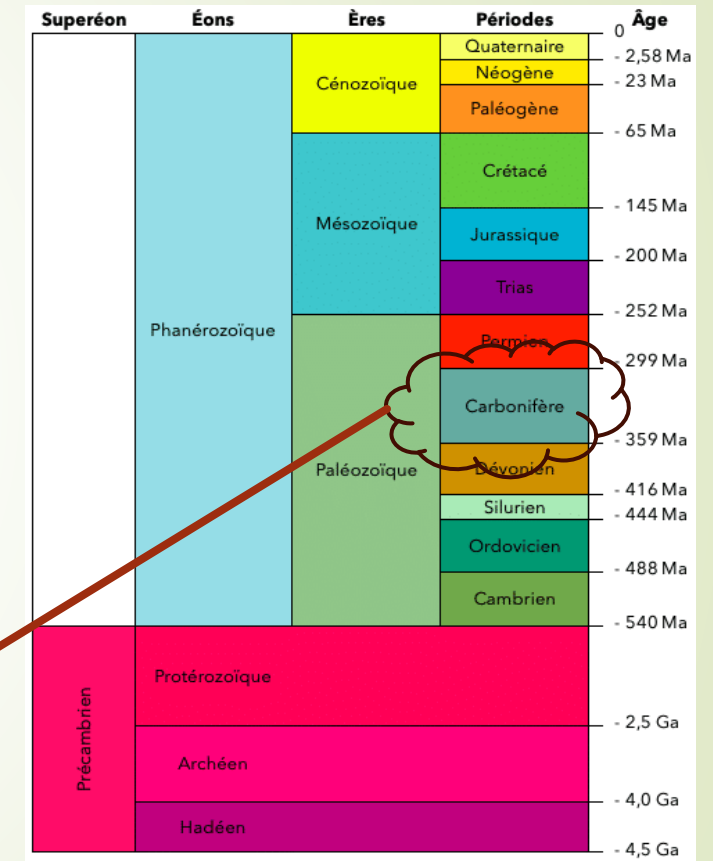


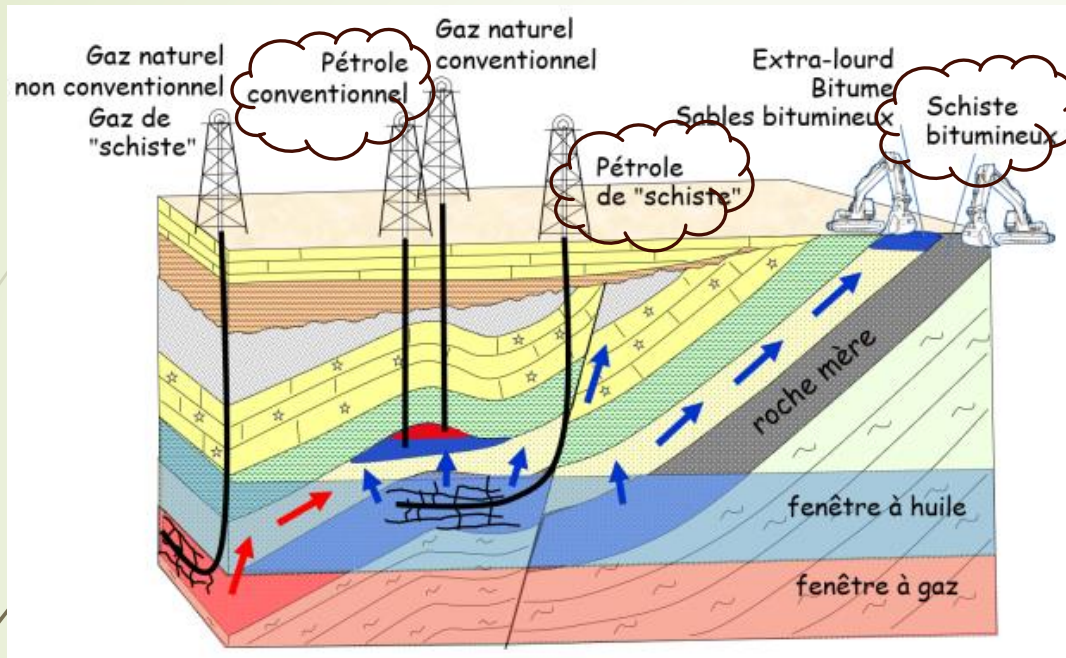
Teneur en carbone



Climat du carbonifère

- Chaud et humide (20°)
- Pangée et zones lagunaires étendues
- Taux de O₂ 35%
- Taux de CO₂ 1500 ppm (400 ppm actuellement)





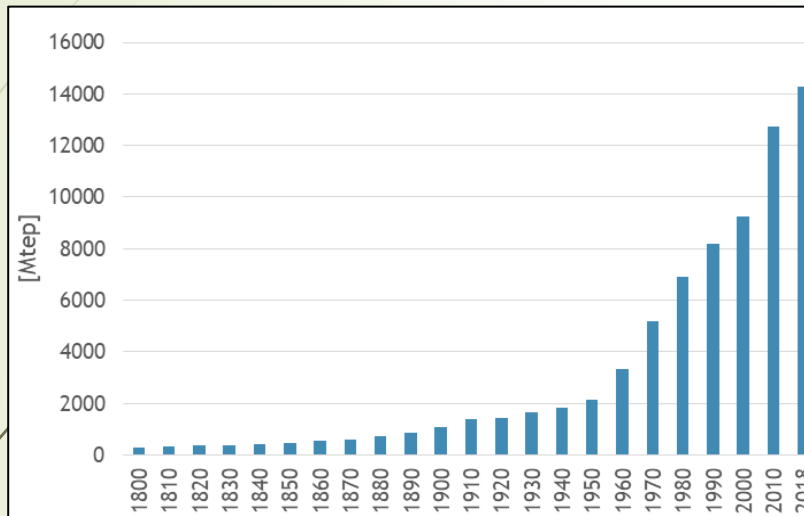
Supérieur	Éons	Ères	Périodes	Âge	
Phanérozoïque	Cénozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	0	
			Néogène	- 2,58 Ma	
			Paléogène	- 23 Ma	
		Mésozoïque	Mésozoïque	Crétacé	- 65 Ma
				Jurassique	- 145 Ma
				Trias	- 200 Ma
				Permien	- 252 Ma
		Paléozoïque	Paléozoïque	Carbonifère	- 299 Ma
				Dévonien	- 359 Ma
				Silurien	- 416 Ma
				Ordovicien	- 444 Ma
Précambrien	Protérozoïque	Cambrien	- 488 Ma		
			- 540 Ma		
			- 2,5 Ga		
		Archéen	- 4,0 Ga		
		Hadéen	- 4,5 Ga		



L'énergie dans tous ses états

Le pétrole est la ressource la plus critique

Culturesciencesphysiques-ens-Lyon

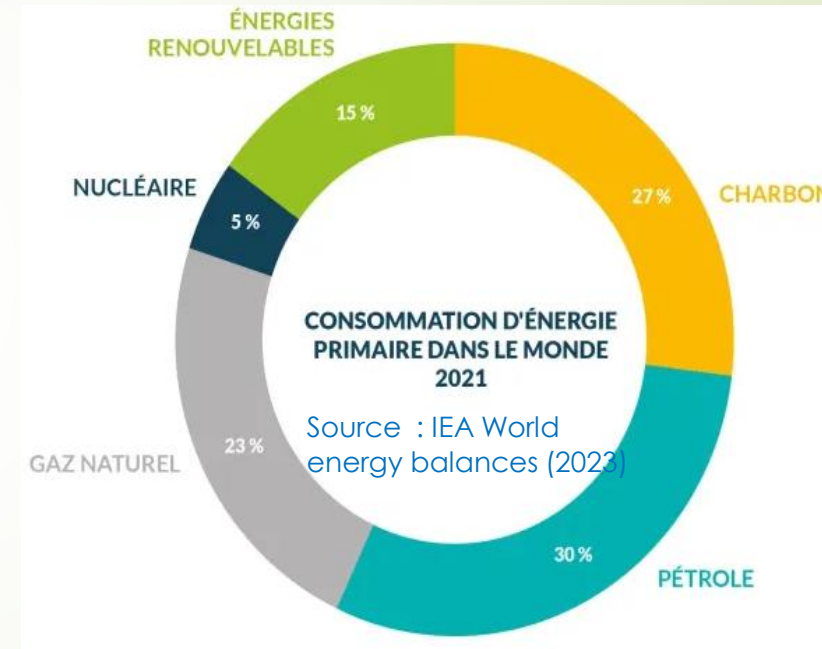


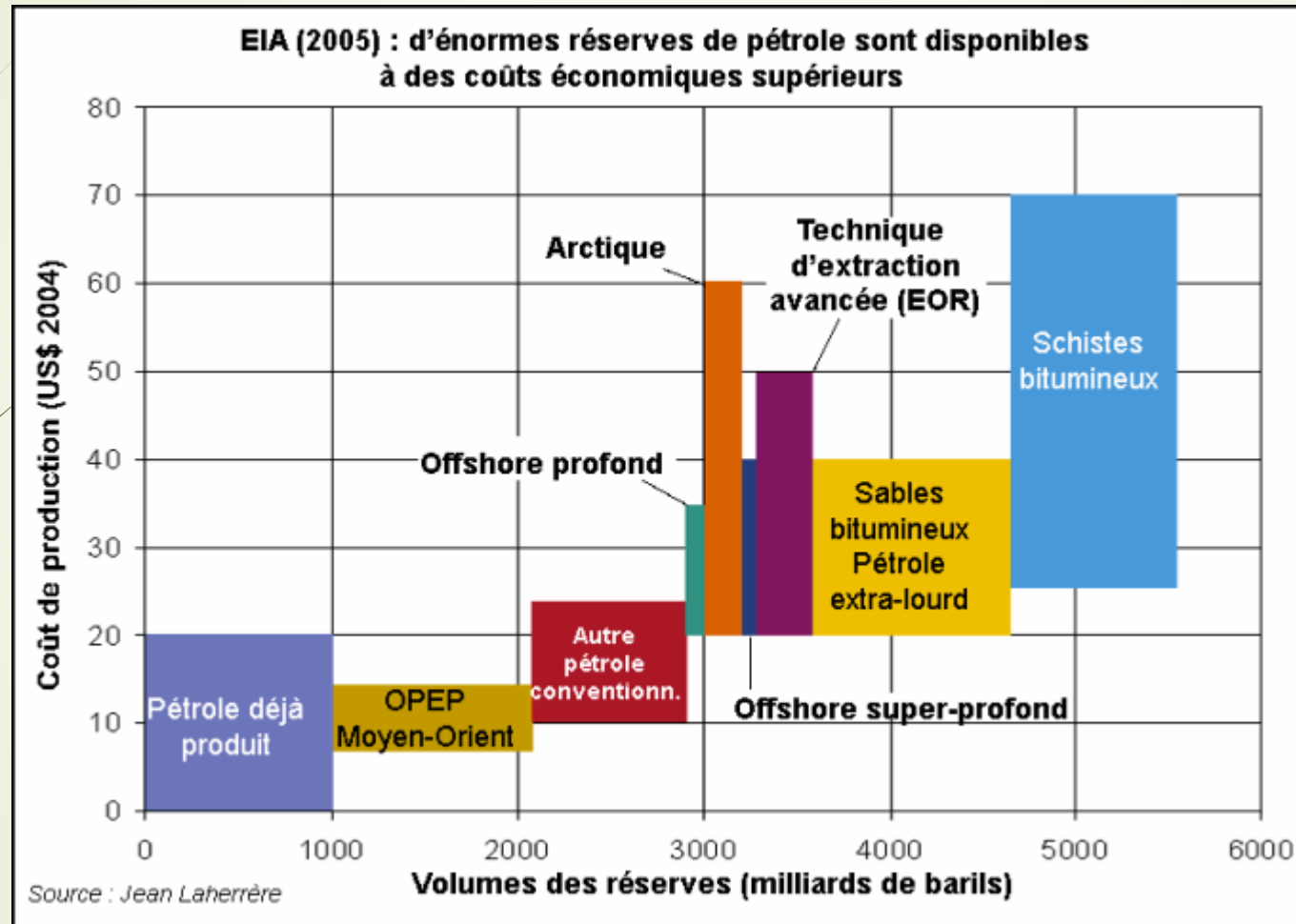
Évolution de la production d'énergie primaire

Ressources = quantités estimées disponibles dans la nature

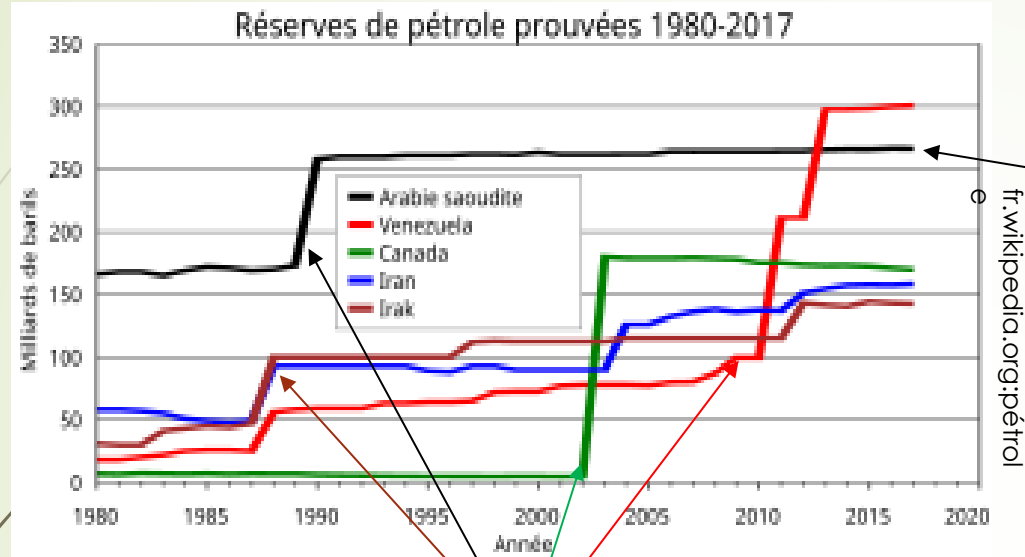
Réserves = quantités accessibles techniquement et économiquement

réserves \ll ressources





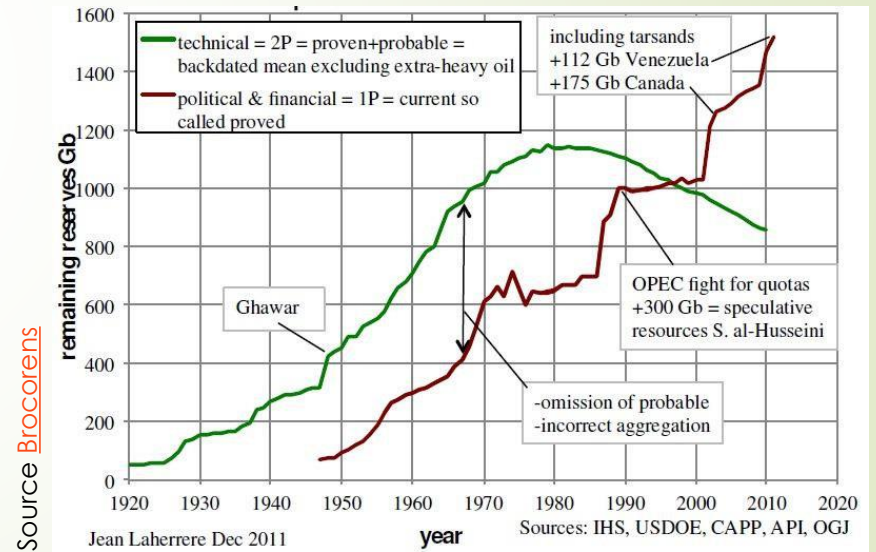
Réserves = quantités accessibles techniquement et économiquement



Réserves constantes malgré l'extraction ?

Découvertes miraculeuses !

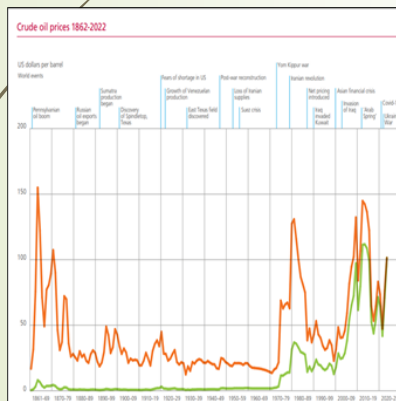
La « finance » et la « technique »



Estimation (2024) des réserves d'énergie en stock

- **Pétrole** : environ 50 ans au rythme de production actuel
- **Gaz** : environ 50 ans
- **Charbon** : environ 110 ans
- **Uranium** : environ 100 ans (sur la base des réacteurs de 2^{ème} et de 3^{ème} génération, des milliers d'années dans le cas d'une industrialisation des surgénérateurs)

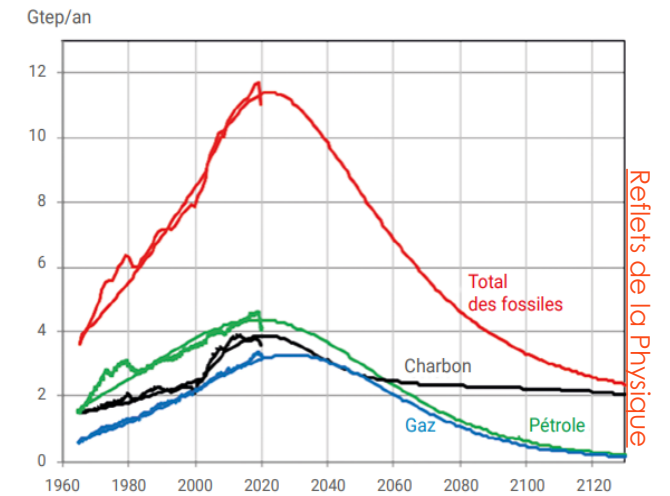
Connaissancesdesenergies.org



Review of World energy - 2023

Selon des modèles empiriques de consommation:

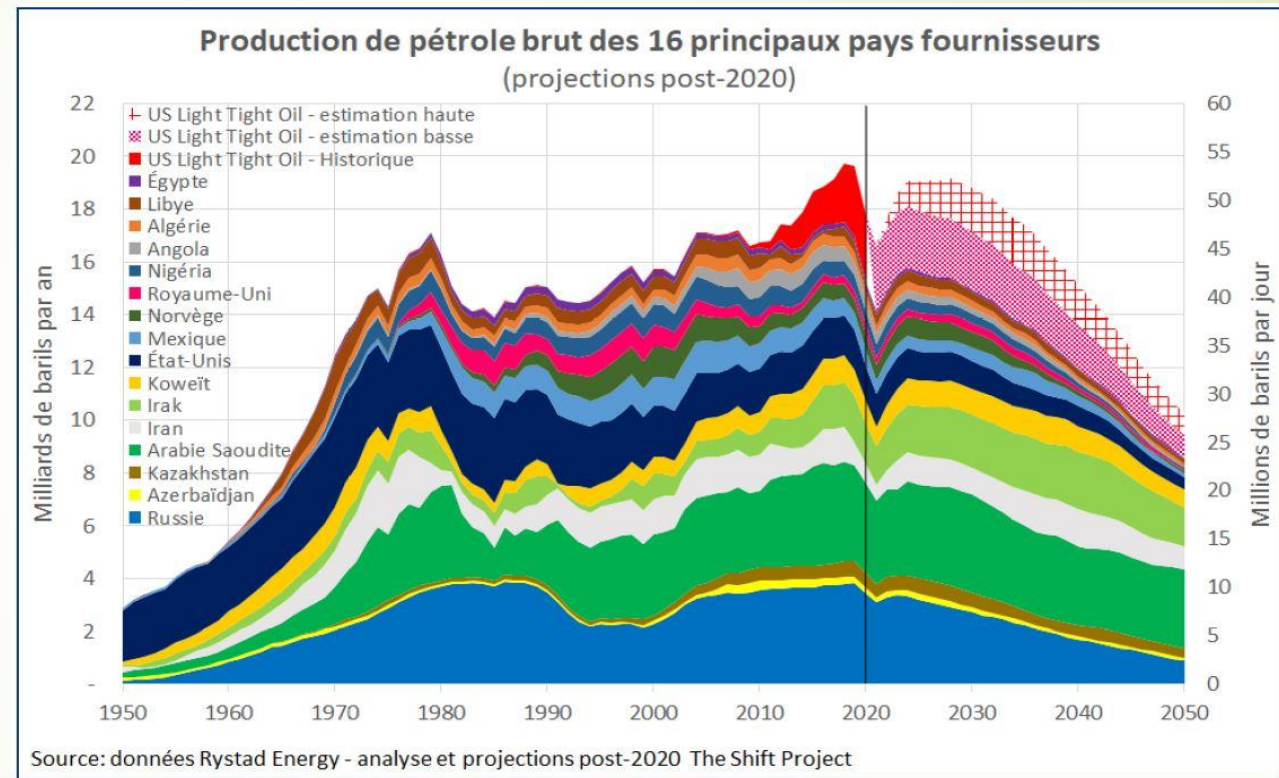
- Le pic du pétrole aurait été atteint en 2020
- Le pic du gaz le serait en 2030
- Le pic du charbon n'est pas définissable



1. Données empiriques de consommation des combustibles fossiles (courbes fluctuantes) et résultats du modèle de Hubbert (courbes lisses).

Production concentrée dans certaines zones du monde

Tendance globale à stabilisation, puis décroissance



[Reflète de la Physique](#)

- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)

Εὕρηκα EROI



Pour « produire » de l'énergie, il faut... de l'énergie

Taux de retour énergétique (EROI)

$ERoEI = (\text{énergie collectée}) / (\text{énergie investie})$

$$EROI = \frac{\text{énergie collectée}}{\text{énergie investie}}$$

Une loi de la Nature pour les individus et la société

l'énergie récoltée > 1 l'énergie pour la récolter



« Stratégie optimale de recherche de nourriture (optimal foraging) »

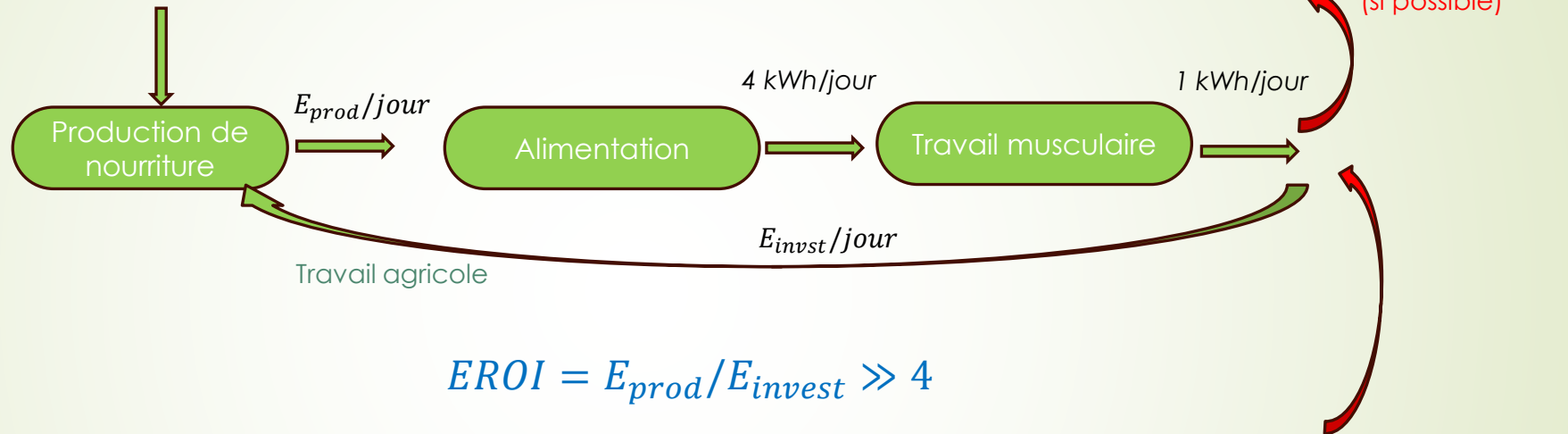
La récolte doit être en quantité supérieure aux semences

L'énergie dépensée pour la nourriture doit être inférieure à celle de la nourriture collectée

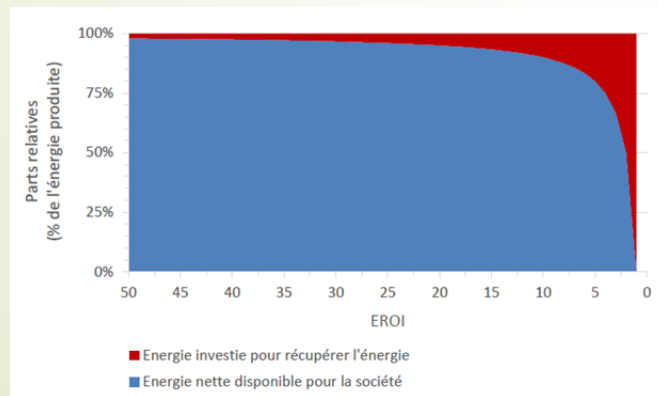


Exemple : agriculture néolithique

Rayonnement solaire

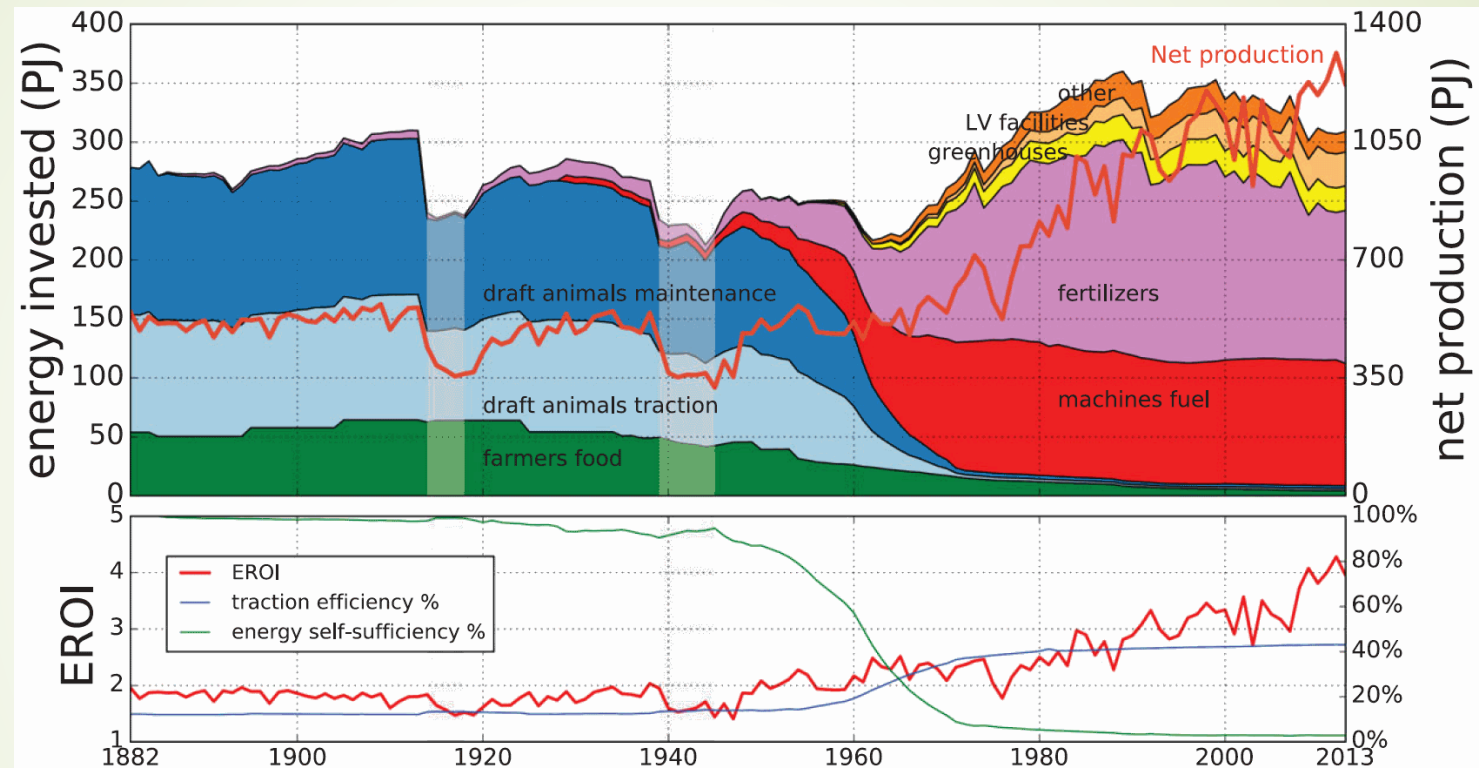


$$EROI = E_{prod}/E_{invest} \gg 4$$



EROI à diminuer, si aide animale et/ou utilisation de machines

EROI à multiplier par le nombre de personnes à charge



Resiliencealimentaire.org

Rôle du machinisme, remplaçant la traction animale
Utilisation des engrais
→ croissance du EROI → baisse de l'emploi agricole

Le pétrole



Puits (Arkansas milieu XIX^{ème})



Plateforme en eau profonde



Reporterre.net

Gaz de schiste

EROI

Grandeur estimée, moyennée sur toutes les situations

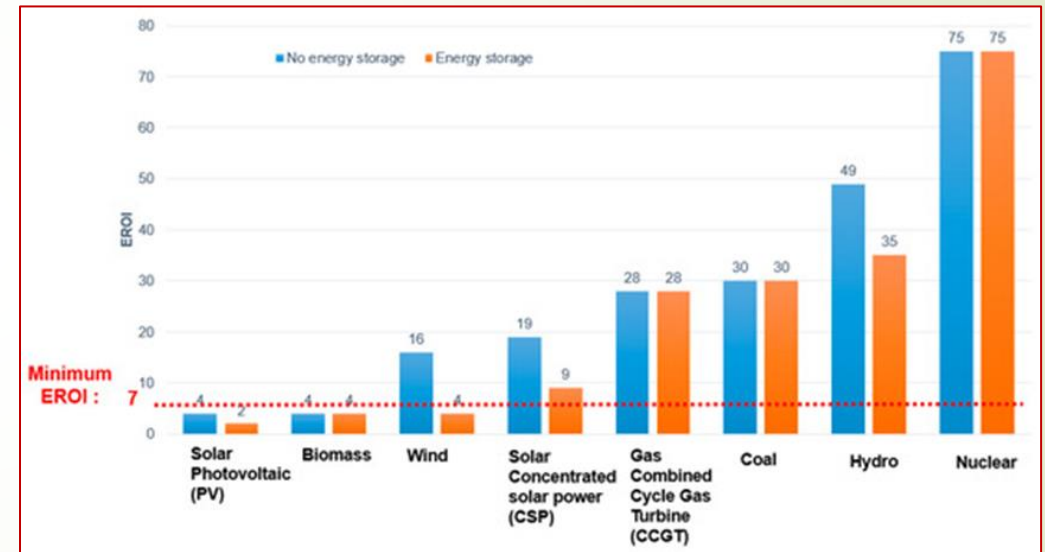
Pétrole	
• US(XIX ^{ème} siècle), Arabie Saoudite	100
• US, Canada (1970)	50, 30
• Mer du Nord (1980)	25
Gaz de schiste (2020)	4
Charbon (US, Chine)	60-30
Ensemble énergies fossiles (2013)	15

- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.



Les **énergies en flux** demandent des investissements importants
 Construire un barrage, une éolienne nécessite beaucoup d'**énergies en stock** (génie civil, béton, turbines,...)

Énergies en flux	EROI
Hydroélectricité	≈ 50
Éolien, solaire sans stockage	≈ 15
Éolien, solaire avec stockage	≈ 4
Bio carburant	≈ 1,5



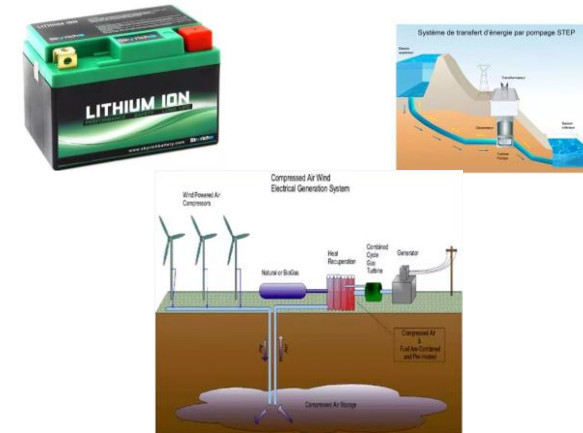
Reflets de la Physique N° 77

Intermittences → Le stockage diminue drastiquement l'efficacité (EROI)

EROI des stockages d'énergie

- Batterie acide-plomb ≈ 5
- Batterie lithium-ion ≈ 32
- STEP (pompage hydraulique) ≈ 700
- Air comprimé ≈ 800

Source Wikipédia



Quel taux de retour nécessaire pour la pérennité d'une société humaine moderne ?

Dépend de l'objectif de la société : stabilité économique, confort de vie, croissance de l'index de développement (IDH)

Pays de l'OCDE (stabilité) → EOR ≈ 7

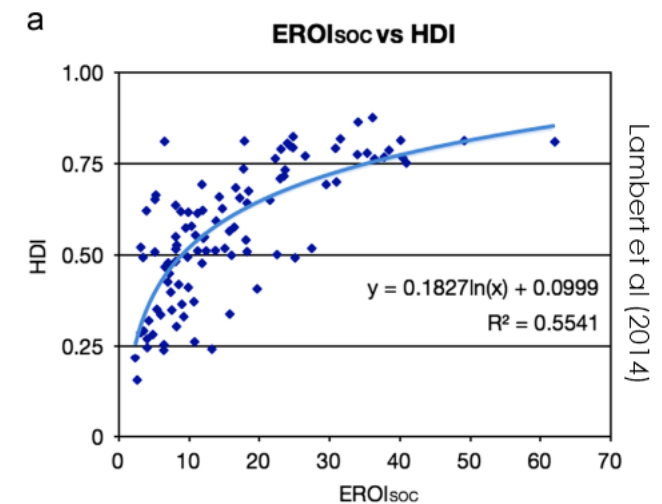
→ 85% de l'énergie disponible pour la société

[Weißbach et al. \(2013\)](#)

Atteindre un bon niveau de développement → EOR ≈ 15

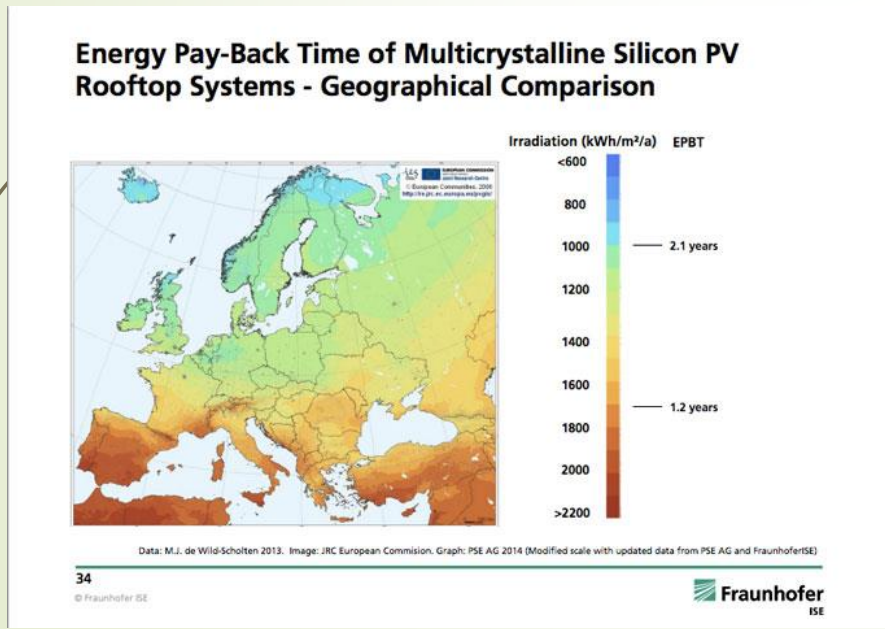
→ 93% de l'énergie disponible pour la société

[Lambert et al \(2014\)](#)

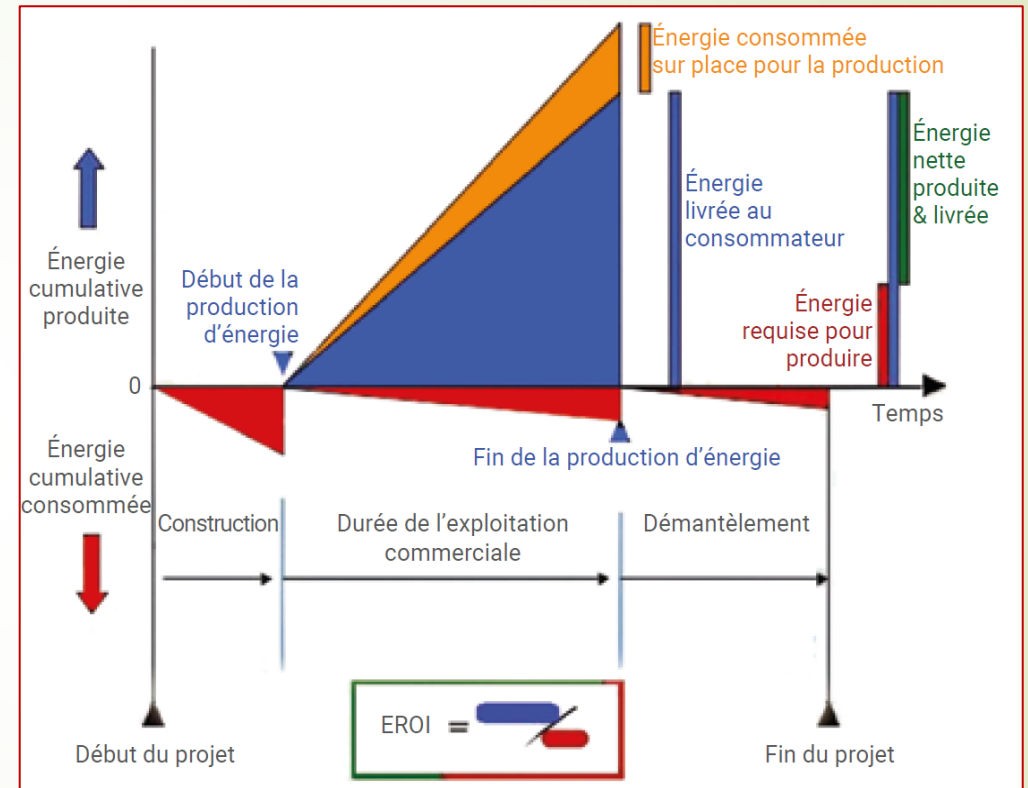


Un moyen de « production » énergétique **consomme** de l'énergie pour sa construction, sa maintenance et son démantèlement.

Un critère d'efficacité est le **temps d'amortissement** (mais dépend du contexte économique)



Analyse du cycle de vie d'un système énergétique



- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.
- **Le taux de retour énergétique nécessaire à une société actuelle est de l'ordre de 7-15. Il est difficilement atteint pour la plupart des énergies en flux (éolien, voltaïque) avec stockage pour gérer l'intermittence.**

Disponibilité, mobilité

Utiliser l'énergie efficacement là où sont les besoins.

Comparer les différentes formes d'énergie

30

Comparons les énergies de ces 5 systèmes :



Un petit déjeuner
(500 kcal)



Un camion de
12 tonnes à 65
km/h

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$



Un rocher d'une
tonne à 200 m
de hauteur

$$E = mgh$$



½ verre (6cl)
d'essence
36 MJ/l



Fission de
0,025 μg d' U_{235}
80 000 MJ/g

Leur énergie est identique
2 Mégajoules (1 MJ = 10^6 Joules)

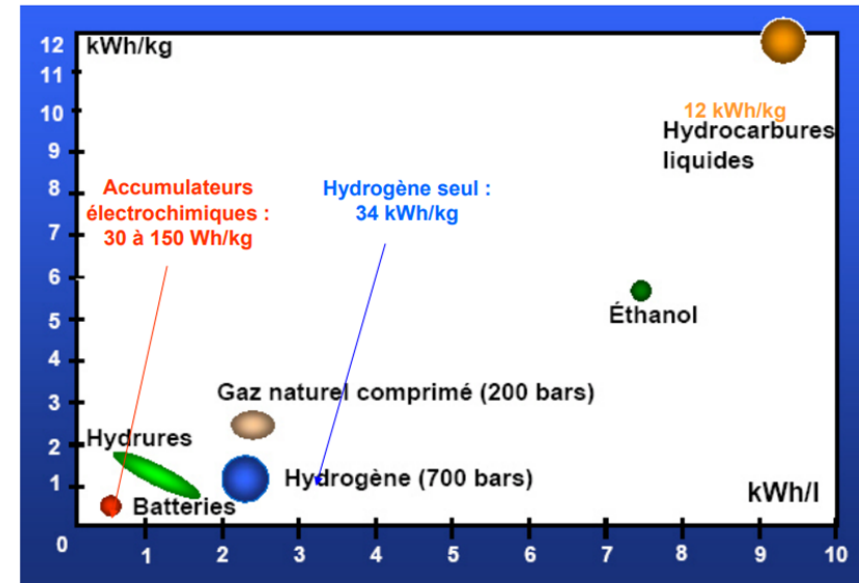
Source	Energie MJ/kg	Type d'énergie	Remarques
Batterie au Plomb	0,1	Chimique	Rechargeable
Pile alcaline	0,6	Chimique	Non rechargeable
Accu Lithium	1,8	Chimique	Rechargeable
Bois	16,2	Chimique	Energie de flux
Glucides	17,0	Chimique	Nutrition
Graisses	37,0	Chimique	Nutrition
Essence	47,2	Chimique	Energie de stock
Uranium-235	79 500 000	Fission	Energie de stock
Hydrogène (isotopes)	330 000 000	Fusion	Technologie no

Source Wikipedia - Densité massique d'énergie

On retrouve l'intensité des forces fondamentales sous-jacentes

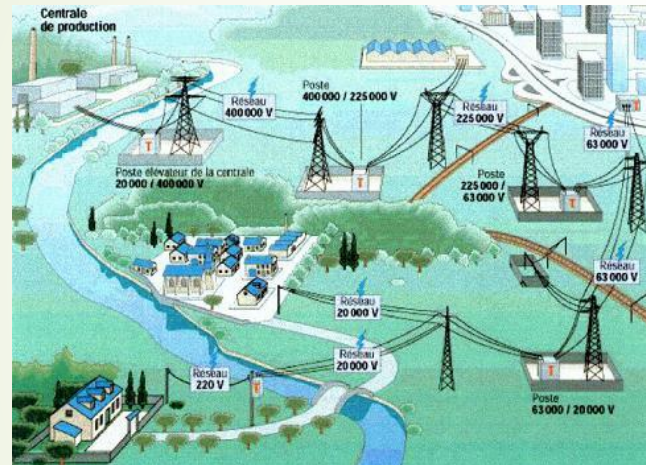
Intense recherches technologiques

Energie massique et volumique de différents moyens de stockage

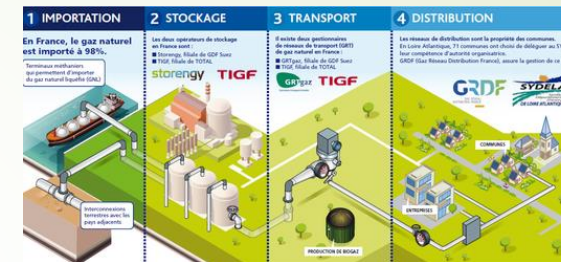


Source : A. Rojey IFP, ECRIN 2006

Critère : distribution instantanée en réseau



<http://schema-electriques.blogspot.com/2012/12/le-reseau-electrique.html>



<http://www.sydele.fr/organisation-du-service-public-du-gaz-en-france-2/>



Électricité la forme d'énergie reine
Ce n'est pas une énergie primaire

- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.
- Le taux de retour énergétique nécessaire à une société actuelle est de l'ordre de 7-15. Il est difficilement atteint pour la plupart des énergies en flux (éolien, voltaïque) avec stockage pour gérer l'intermittence.
- La densité énergétique (volumique, massique) des moyens de stockage est maximale (hors nucléaire) pour les carburants fossiles

Remplacer énergie de stock (concentrée) → énergie de flux (dispersée)



« production
d'énergie »
consommatrice
d'espace



Production annuelle d'énergie par m²

Type d'énergie	kWh/m ² /an
Gaz	14 000
Nucléaire	12 800
Eolien	250
Hydraulique	240
Solaire	150

<https://www.greenandgreatagain.com/>

- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.
- Le taux de retour énergétique nécessaire à une société actuelle est de l'ordre de 7-15. Il est difficilement atteint pour la plupart des énergies en flux (éolien, voltaïque) avec stockage pour gérer l'intermittence.
- La densité énergétique (volumique, massique) des moyens de stockage est maximale (hors nucléaire) pour les carburants fossiles
- L'exploitation des énergies en flux (dispersées) implique une occupation de l'espace (visibilité) importante.

L'entropie

Utiliser efficacement les énergies
en minimisant l'impact sur
l'environnement

L'entropie

Loi de Murphy

*Tout ce qui est susceptible d'aller mal
ira mal mal mal mal*

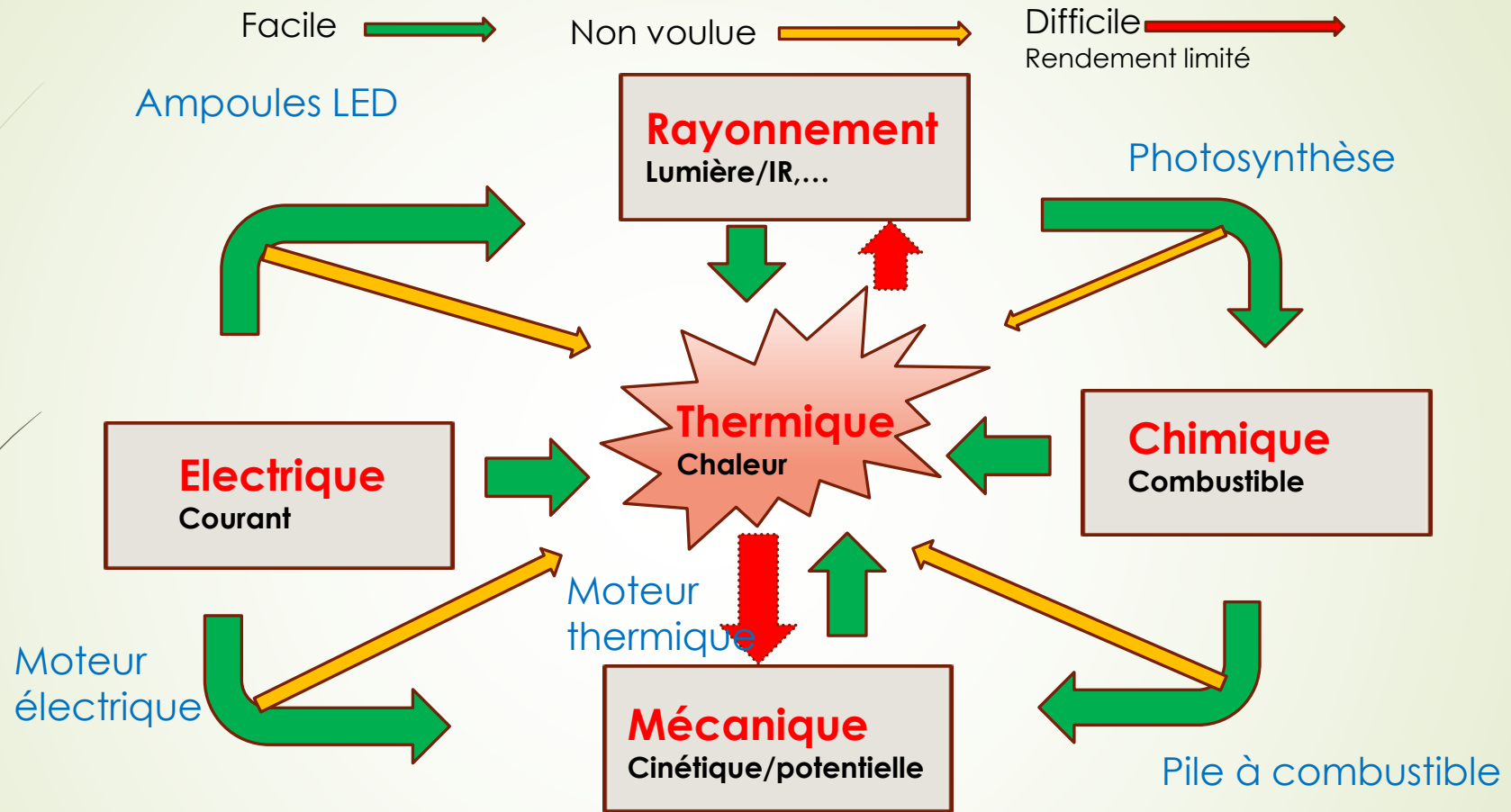
**Pourquoi la tartine
tombe toujours
du côté du beurre**



*La science
de la loi
de Murphy*

Transformation entre différentes formes d'énergie

38



Les transformations d'énergie se produisent avec production (non souhaitable) de chaleur. Transformer la chaleur en énergie mécanique ou radiative est difficile avec un faible rendement

Toutes les énergies se « valent » elles ?

39

Energie (rappel)

Capacité à **modifier un système (à agir)** : effectuer un travail, donner du mouvement, changer l'état de la matière, varier la température, ...

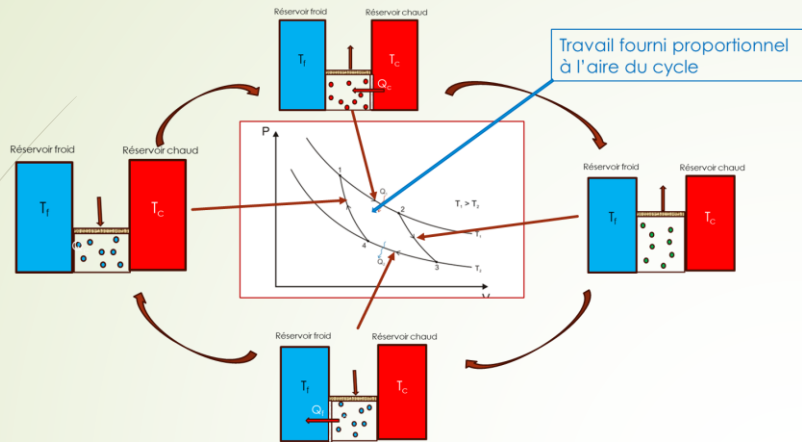
Mais, pourquoi la **chaleur** (énergie thermique) est-elle **difficile à transformer** en une autre énergie ?

Pourquoi **apparaît-elle comme effet indésirable** dans la plupart des transformations entre énergies ?



entropie

Toute l'énergie n'est pas disponible pour les transformations



Clausius (1850)

$$\Delta S = \oint_{ABCD} \frac{dQ}{T} \geq 0$$

S est l'entropie

- = 0 si sans perte, ni frottements ; mouvement (presque) à l'équilibre
- Sinon > 0

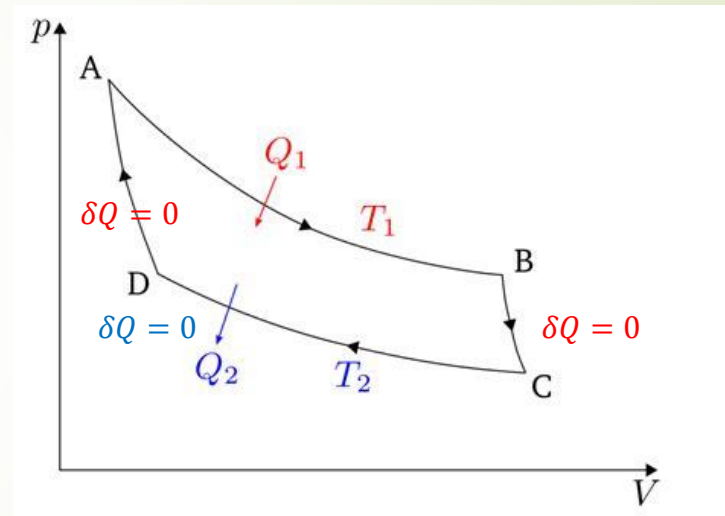
L'entropie thermodynamique

Q_1 énergie entrante (> 0)

Q_2 énergie sortante (< 0)

W travail fourni (> 0)

$Q_1 + Q_2 - W = 0$ énergie conservée



Rendement maximum théorique

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \geq 0 \Rightarrow W \leq Q_1 \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right)$$

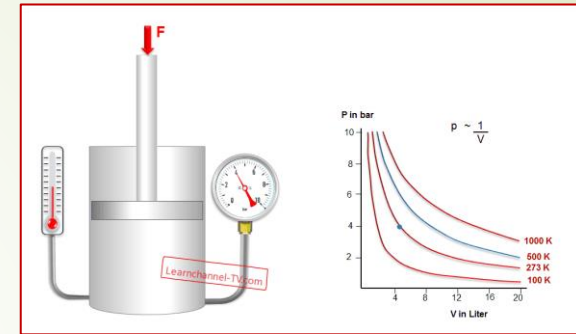
Les 3 variables de base de la thermodynamique classique

- P : pression (*intensive*, Pa = N/m² → 1 bar = 10⁵ Pascal)
- V : volume (*extensive*, m³)
- T : température (*extensive*, K)

Pour les gaz parfaits → $P V = n k_B T$ (Boyle-Mariotte)

n nombre de molécules

k_B constante de Boltzmann (1,380649 10⁻²³ J(oule)/K)



Une nouvelle variable l'entropie : S (**extensive** J(oule)/K)

Un 2^{ème} principe :

« Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale incluant l'entropie du système et du milieu extérieur. On dit alors qu'il y a création d'entropie. »

S'il y a transfert d'énergie ΔQ

$$\Delta S \geq \frac{\Delta Q}{T} \text{ (Clausius, égalité si le transfert est réversible)}$$



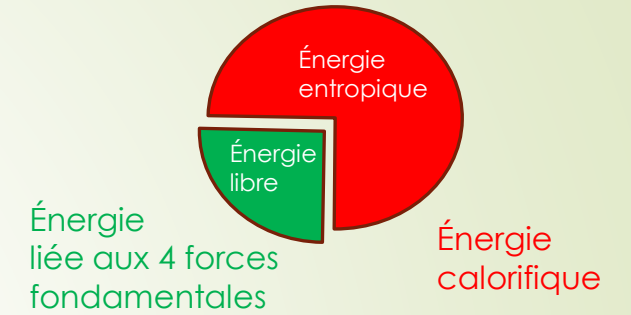
- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.
- Le taux de retour énergétique nécessaire à une société actuelle est de l'ordre de 7-15. Il est difficilement atteint pour la plupart des énergies en flux (éolien, voltaïque) avec stockage pour gérer l'intermittence.
- La densité énergétique (volumique, massique) des moyens de stockage est maximale (hors nucléaire) pour les carburants fossiles
- L'exploitation des énergies en flux (dispersées) implique une occupation de l'espace (visibilité) importante.
- L'entropie thermodynamique est une grandeur fondamentale qui caractérise les échanges d'énergie entre systèmes ; elle ne peut que croître.

L'énergie libre d'un système est la part de l'énergie qui n'est pas gelée par l'entropie**

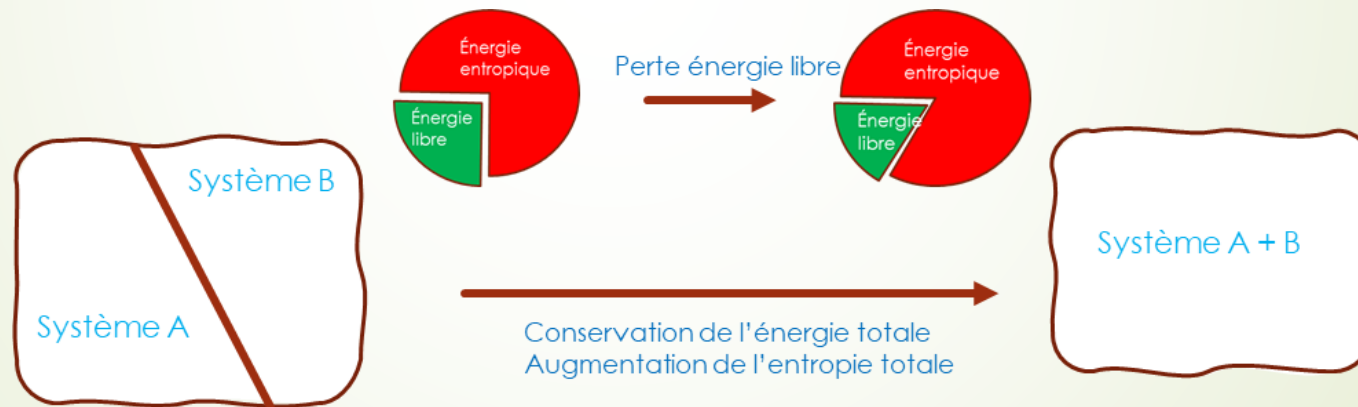
$$E_{\text{libre}} = E_{\text{totale}} - T \times S$$

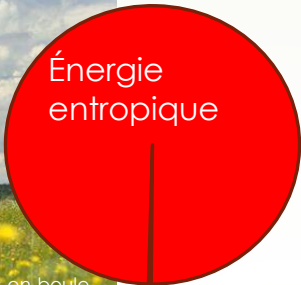
énergie libre = énergie totale – température x entropie

** formulation globale, qui demande à être précisée, selon les contextes



Dans les échanges, l'énergie est conservée, mais l'entropie croît

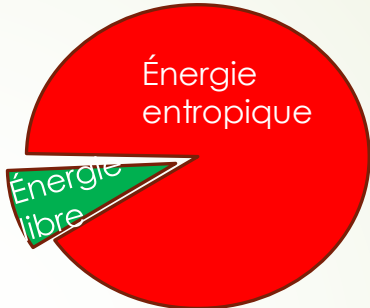




Air calme

- Énergie totale 30 Wh/m³
- Énergie libre 0 (aucune énergie libre)

entropie maximum

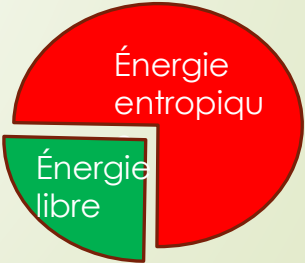


Vent

- Molécules d'air en agitation thermique (420 m/s) + déplacement collectif 10 m/s
- Énergie totale ≈ 30 Wh/m³
- Énergie libre ≈ 0,5 Wh/m³ (énergie éolienne)

→ entropie plus basse

Entropie : détermine la part de l'énergie dégradée (non utilisable directement sous forme mécanique, chimique ou électrique)
Énergie libre : part de l'énergie utilisable





Air calme, pression normale, $T=27^{\circ}\text{C}$

Mole d'« air », 22,4 litres de masse 0,029 kg ; moyenne des molécules d'oxygène et d'azote

$T= 27^{\circ}\text{C}$, soit 300°K

Équilibre thermique : loi de Maxwell- Boltzmann :

$$dN(E) = g(E)dE = Cte * e^{-\frac{E}{k_B T}} dE$$

Où k_B est la constante de Boltzmann : $k_B \simeq 1,4 \cdot 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$

Et le nombre d'Avogadro (nombre molécules par mole = $6 \cdot 10^{23}$)

Énergie moyenne par molécule $\langle E \rangle = k_B T$.

Énergie dans un m^3 d' « air » : $E_T = 6 \cdot 10^{23} \frac{1000}{22,4} * 1,4 \cdot 10^{-23} T \simeq 370 * T(\text{J})$

Soit une **énergie thermique** $E_T \simeq 110 \text{ kJ/m}^3 \simeq 30 \text{ Wh/m}^3$

La masse moyenne d'une molécule d'« air » : $m = \frac{29 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} \simeq 4,8 \cdot 10^{-26} \text{kg}$

La vitesse moyenne d'une molécule : $\sqrt{\frac{2k_B T}{m}} = \left(\frac{840 \cdot 10^{-23}}{4,8 \cdot 10^{-26}} \right)^{1/2} \simeq 420 \text{ m/s}$



Vent régulier de 10 m/s (36 km/h), pression normale, $T=27^{\circ}\text{C}$
 A l'agitation thermique des molécules, il faut ajouter l'énergie collective

Rappel : énergie thermique : $T=27^{\circ}\text{C}$, soit 300°K

Équilibre thermique : $E_T \approx 110 \text{ kJ/m}^3 \approx 30 \text{ Wh/m}^3$

Vitesse moyenne des molécules $\approx 420 \text{ m/s}$

Masse volumique de l'air (niveau de la mer) : $\rho = 1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Énergie cinétique collective de 1 m^3 à 10 m/s : $E_C = \frac{1}{2}mv^2 = 61,5 \text{ J/m}^3$

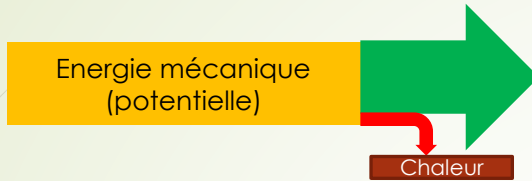
L'énergie totale $E \approx (110\,000 + 60) \text{ J/m}^3$

Mais les 60 J/m^3 sont de l'énergie libre transformable en énergie mécanique \rightarrow électrique (éolienne)



Le vent à l'échelle microscopique



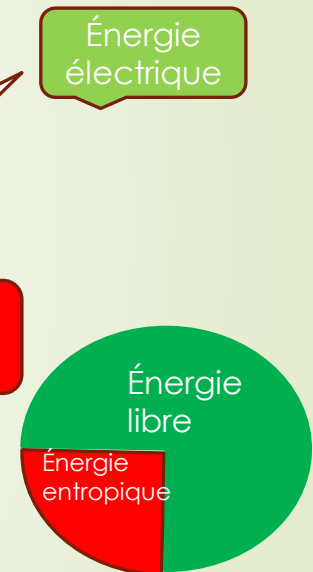


Énergie mécanique → Chaleur + énergie électrique

Un processus qui crée **peu d'entropie** (beaucoup d'énergie libre)

Quasi réversible
(remonter l'eau dans le barrage pour stocker de l'énergie)

<https://business-ethics.com/>



Un autre exemple : une centrale au charbon

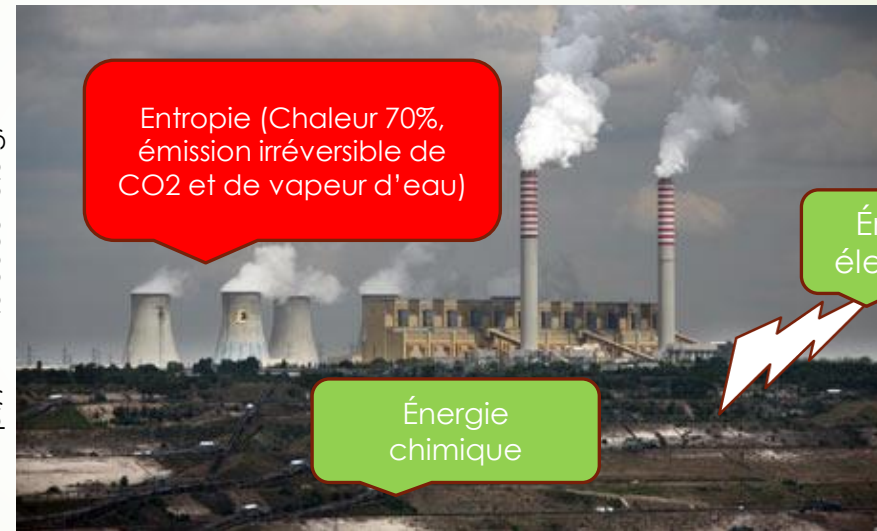
Energie chimique

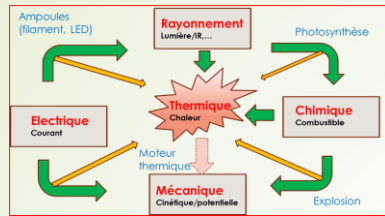
Chaleur
Vapeur
gaz

Énergie chimique → Chaleur + Déchets + énergie électrique

Un processus qui crée
beaucoup d'entropie
(rendement d'énergie
libre faible)

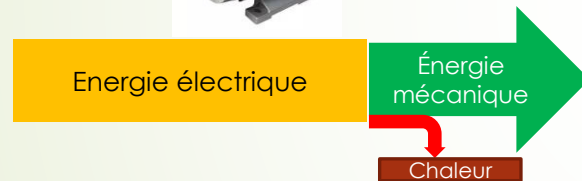
Irréversible
(comment recapturer
le CO2 et la vapeur
d'eau émise)

<http://www.oleocene.org/>



Toute transformation crée de l'entropie :

- Pertes (chaleur)
- Déchets (usure, gaz d'échappement, ...)



Signatures de l'entropie

- Bas rendement
- Déchets
- Irréversibilité (moteur électrique \leftrightarrow dynamo ; moteur thermique \rightarrow ??)

$$\text{énergie libre} = \text{énergie totale} - \text{température} \times \text{entropie}$$

entropie

La chaleur est la forme d'énergie la plus entropique

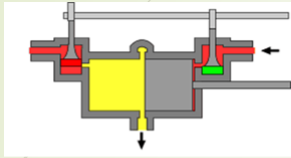
- Rendement faible des moteurs thermiques
- Apparaît comme « déchet » dans les transformations d'énergies

Les formes d'énergie les moins entropiques (part d'énergie libre maximum), sont liées aux interactions fondamentales :

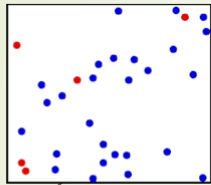
- Énergie radiative (ex : rayonnement solaire, ondes)
- Énergie électrique (ex : courants)
- Énergie mécanique (ex : eau d'un barrage)
- Énergie chimique (ex : accus, charbon)

- En première approximation, la création de chaleur est une estimation de la création d'entropie
- Dans les bilans d'énergie, la notion d'énergie libre est plus pertinente

- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.
- Le taux de retour énergétique nécessaire à une société actuelle est de l'ordre de 7-15. Il est difficilement atteint pour la plupart des énergies en flux (éolien, voltaïque) avec stockage pour gérer l'intermittence.
- La densité énergétique (volumique, massique) des moyens de stockage est maximale (hors nucléaire) pour les carburants fossiles
- L'exploitation des énergies en flux (dispersées) implique une occupation de l'espace (visibilité) importante.
- L'entropie est une grandeur fondamentale qui caractérise les échanges d'énergie entre systèmes ; elle ne peut que croître.
- L'entropie caractérise la part de l'énergie d'un système non immédiatement mobilisable pour des transformations (énergie thermique) ; le complément est l'énergie libre.



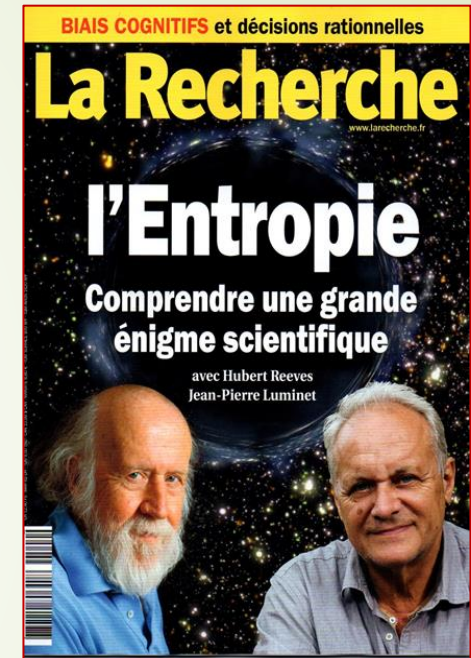
L'entropie **thermodynamique** des systèmes macroscopiques (Carnot, Clausius)



L'entropie **statistique** d'un système au niveau microscopique (Boltzmann)



L'entropie en théorie de **l'information**: quantité d'information contenue ou délivrée par une source d'information (Shannon)



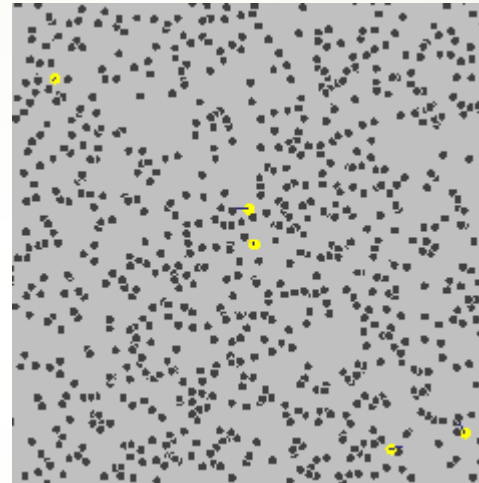
Tout ça pour ça : rendement des machines thermiques ?

Comment relier le microscopique et le macroscopique ?

53

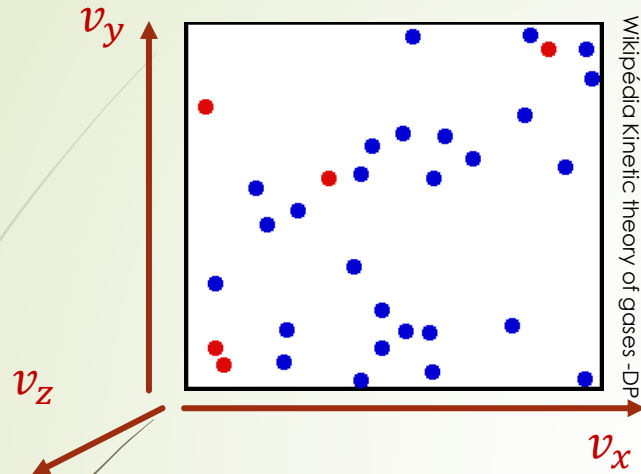
En 1827, Brown observe au microscope le mouvement de grains de pollen.

Simulation du mouvement
des grains de pollen



<http://weelookang.blogspot.com>

En 1865, Une première estimation du nombre de molécules par cm^3 de gaz
Jean Perrin (1913), le nombre d'Avogadro $6,022 \cdot 10^{23}$ par mole (22,4 litres de gaz)



Maxwell (1860), loi de probabilité pour la vitesse des molécules dans un gaz à l'équilibre

$$G_x(v_x) = N e^{-\frac{mv_x^2}{2k_B T}}$$

Si l'on prend les 3 directions des vitesses (v_x, v_y, v_z)

$$G(v_x, v_y, v_z) = N^3 e^{-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2k_B T}} = N^3 e^{-\left(\frac{mv^2}{2k_B T}\right)} = G(v)$$

Probabilité d'avoir une vitesse $v = |\vec{v}|$, $\Rightarrow 4\pi v^2 G(v)$

- **La température T** : énergie cinétique moyenne des molécules

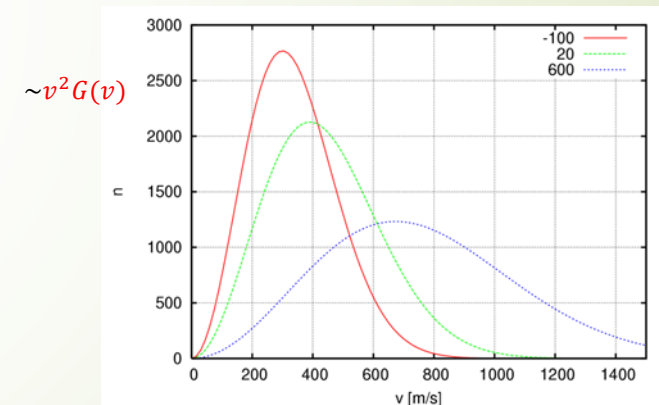
$$\langle E_c \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

- **La pression P** : chocs (transfert de moment cinétique) des molécules sur la paroi

$$P = \frac{1}{3} \rho \langle v^2 \rangle$$

ρ est la masse volumique du gaz



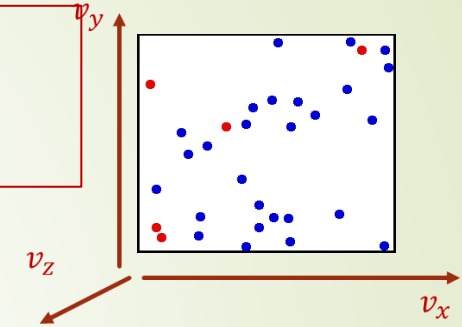
Probabilité des vitesses de molécules en fonction de la température

Wikipedia –statistique de Boltzmann - Maxwell

Loi de Maxwell- Boltzmann (pour les amateurs éclairés)

Hypothèses :

- *Molécules libres* en interaction (chocs)
- *Équilibre*
- *Isotropie* : pas de direction privilégiée, espace uniforme dans toutes les directions



Établissement de la loi :

- $g(v_x)$: probabilité de la vitesse des molécules dans la direction $0x$; $g(v_y)$, $g(v_z)$ pour les directions $0y$ et $0z$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} dv_x g(v_x) = 1, \text{ idem } g(v_y), g(v_z)$$

- $G(v_x, v_y, v_z)$: probabilité d'avoir une vitesse $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) \rightarrow G(v_x, v_y, v_z) = g(v_x) g(v_y) g(v_z)$

- Un peu de « magie » mathématique

$$\frac{\partial G(v_x, v_y, v_z)}{\partial v_x} = \frac{\partial \{g(v_x)g(v_y)g(v_z)\}}{\partial v_x} = \frac{G(v_x, v_y, v_z)}{g(v_x)} \frac{\partial g(v_x)}{\partial v_x}$$

2 formes égales

- Or $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$: $G(v)$ probabilité d'avoir une vitesse absolue v

$$\frac{\partial G(v_x, v_y, v_z)}{\partial v_x} = \frac{\partial G(v)}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial v_x} = \frac{\partial G(v)}{\partial v} \frac{v_x}{v}$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial G(v)}{\partial v} = \frac{1}{g(v_x)} \frac{\partial g(v_x)}{\partial v_x}; \text{ idem } v_y, v_z$$

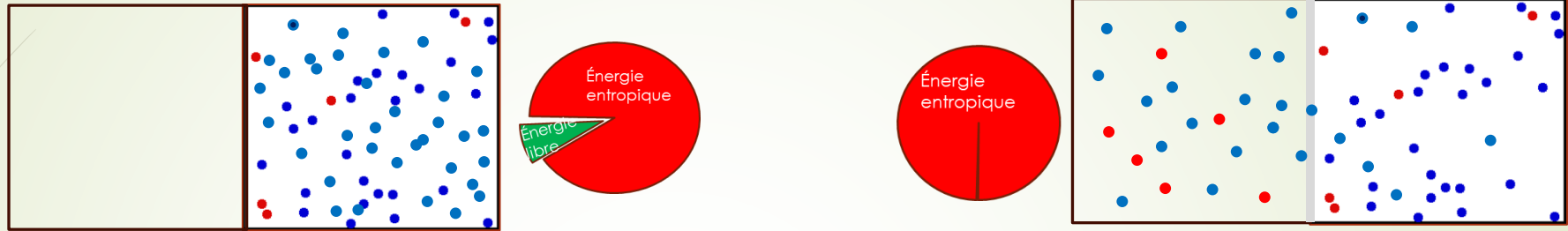
- Donc

$$\frac{1}{g(v_x)} \frac{\partial g(v_x)}{\partial v_x} = -\gamma = \text{Cte} \Rightarrow g(v_x) = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} e^{-\frac{\gamma}{2}v_x^2}$$

- Thermodynamique $\rightarrow \gamma = \frac{m}{k_B T}$

La loi de Maxwell-Boltzmann :

$$G(v) = G(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}}$$



Capacité à évoluer
 → Entropie basse
 Ω_i états possibles

Boltzmann

$$S = k_B \ln \Omega$$

Ω le nombre d'états possibles (à état macroscopique constant)

Système à l'équilibre
 → Entropie maximale
 Ω_f états possibles

$$\Delta S = k_B (\ln \Omega_f - \ln \Omega_i) = k_B \ln \frac{\Omega_f}{\Omega_i} \rightarrow k_B \ln 2^n$$

Exemple

$$n = 20 \rightarrow (2)^{20} \sim 1,05 \cdot 10^6$$

$$\Delta S = 13,8 k_B$$

L'état « toutes à droite » est 1 million de fois moins probable

L'entropie croissante traduit l'évolution vers l'état le plus probable

Exemple

$$\text{Et si } n = 10^{23} \rightarrow (2)^{10^{23}} \sim 10^{3 \cdot 10^{22}}$$

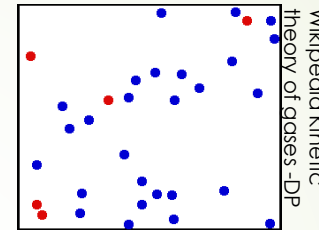
$$\Delta S \sim 10^{23} k_B$$

L'état « toutes à droite » est $10^{3 \cdot 10^{22}}$ fois moins probable

La pression et la température sont des propriétés **émergentes** : elles n'ont pas de sens à l'échelle individuelle des particules

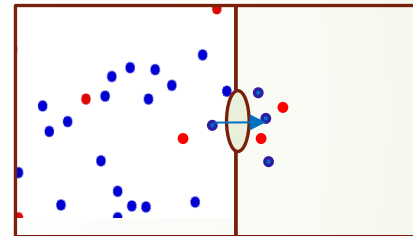
A l'**équilibre** :

- Pas d'évolution globale
- Le « film » paraît **réversible**



Hors **équilibre** ?

- Evolution du système
- Le « film » paraît **irréversible**



Pourquoi un film est-il réversible mais pas l'autre ?

Une équation permet de modéliser cette croissance de l'entropie

Équation de Boltzmann

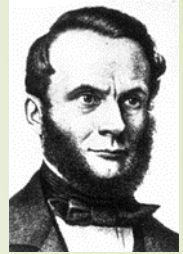
$$f(\vec{r}, \vec{p}; t) \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{m} \overrightarrow{\nabla_r} f + \overrightarrow{F} \overrightarrow{\nabla_p} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\{coll\}}$$

Du
macroscopique

De l'entropie en **thermodynamique** (Clausius - 1850)

L'entropie caractérise la **dégradation de l'énergie lors des échanges entre systèmes** (2^{ème} principe de la thermodynamique)

L'entropie **S** d'un système isolé ne peut qu'augmenter jusqu'à l'équilibre où le système n'évolue plus



Au
microscopique

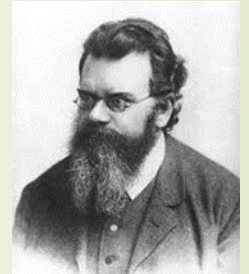
A l'entropie en **physique statistique** (Boltzmann – 1870)

L'entropie d'un système est liée au nombre **W** des **configurations possibles de ses composants internes** (**k** constante de Boltzmann)

L'entropie peut être considérée, dans la plupart des cas**, comme une **mesure du désordre** (qui ne peut que croître dans un système isolé).

** On précisera cette notion plus loin

Une équation modélise la croissance de l'entropie dans les gaz



Sur la tombe de Boltzmann

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

En physique statistique, la croissance de l'entropie - d'un système isolé hors équilibre - traduit l'évolution irréversible vers son état le plus probable, à partir duquel il n'évoluera plus.

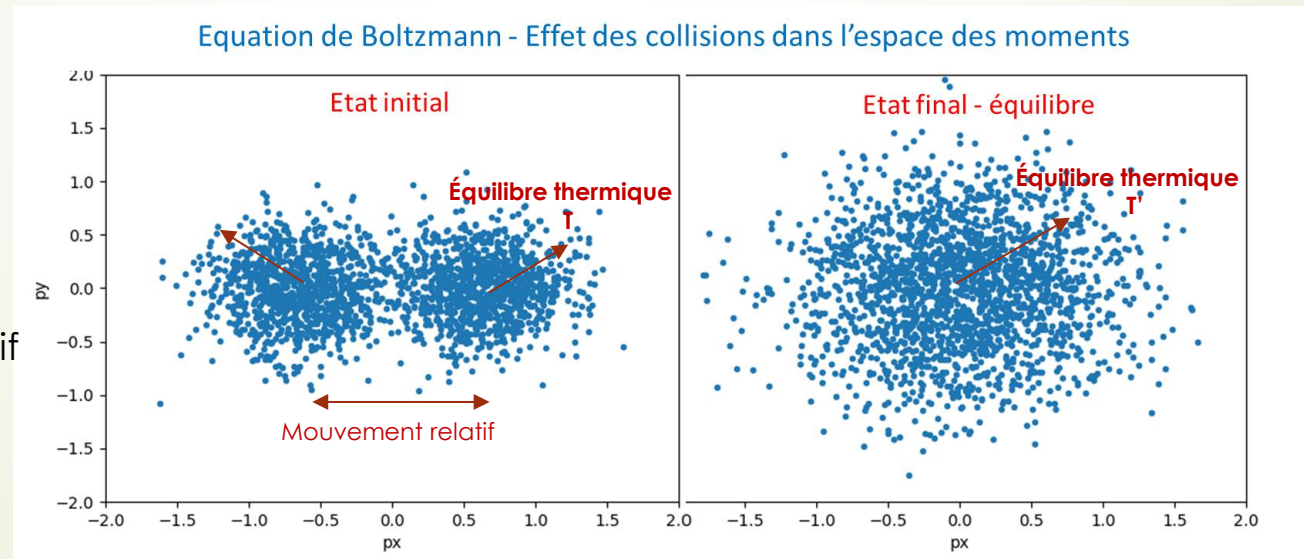
Boltzmann a établi une équation qui décrit l'évolution à partir d'un état quelconque vers l'équilibre pour des systèmes comme des gaz dilués :

$$\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{p}; t)}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{m} \cdot \vec{\nabla}_r f(\vec{r}, \vec{p}; t) + \vec{\nabla}_r V(\vec{r}) \cdot \vec{\nabla}_p f(\vec{r}, \vec{p}; t) = \left(\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{p}; t)}{\partial t} \right)_{coll}$$

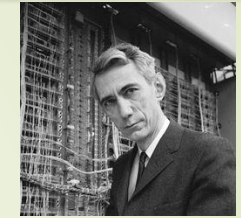
Le système est décrit par une fonction qui donne la répartition des molécules dans l'espace et en vitesse $f(\vec{r}, \vec{p} = m\vec{v}; t)$; cette fonction évolue en fonction des forces $\vec{\nabla}_r V(\vec{r})$ et des collisions binaires entre les molécules $\left(\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{p}; t)}{\partial t} \right)_{coll}$.

La fonction f tend vers un équilibre f_{eq} , qui est la distribution de Boltzmann d'un gaz en équilibre thermique (voir plus haut)

2 gaz en mouvement relatif



Shannon(1948) a élargi le concept d'entropie à la théorie de **l'information** :
 « liée à la quantité d'information contenue ou délivrée par une source d'information » (combien de bits sont nécessaires pour coder l'information)



Shannon (1916-2001)
new-yorker.com

L'entropie (incertitude) $H(X)$ associée la réalisation d'un évènement X parmi tous les cas possibles (chacun ayant la probabilité p_i)

$$H(X) = -k_B \sum_i p_i \ln p_i$$

Exemple (Wkipédia), lancer une pièce (2 cas Pile ou Face, avec la même probabilité

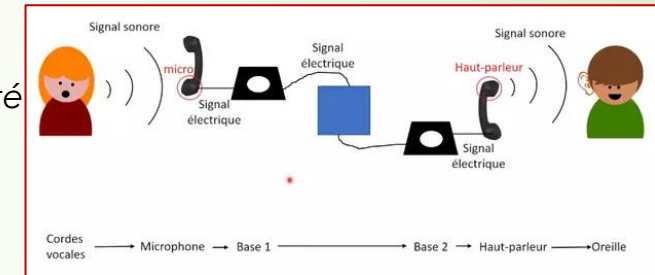
$$H(X) \sim - 2 \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} = 1$$

Si la pièce est biaisée (Pile a une probabilité de 70%):

$$H(X) \sim - 0,7 \ln 0,7 - 0,3 \ln 0,3 \cong 0,88$$

Une pièce avec 2 Face(s) $\Rightarrow H(X) = 0$

L'absence d'information correspond à l'entropie maximale ; la connaissance partielle d'information diminue l'entropie.



Source sur [YouTube](#)

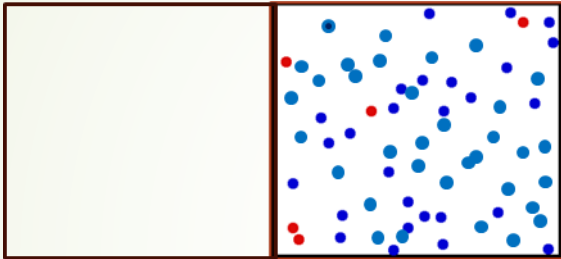
En théorie de l'information, l'entropie aussi ne peut que croître

« L'entropie peut effectivement se définir comme l'information perdue, le désordre, la multiplication des configurations possibles, des irrégularités, la perte de forces structurantes à longue portée et le manque d'information qui en résulte. Quand l'entropie augmente, notre information diminue »

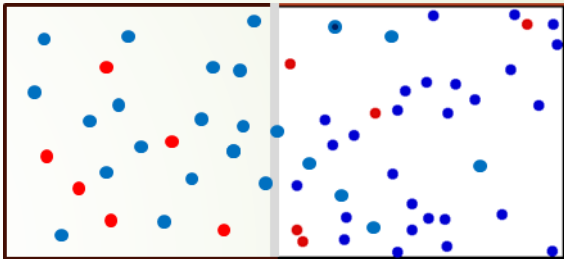
<https://jeanzin.fr/entropie>

La croissance de l'entropie statistique peut s'interpréter comme une perte d'information sur le système

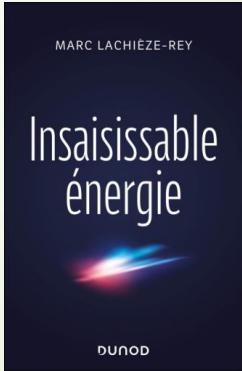
On a une certaine information sur l'état interne du système



On a aucune information sur l'état interne du système



Le lien et la cohérence entre les différentes définitions de l'entropie sont toujours discutées, en particulier dans l'infiniment grand (entropie initiale de l'univers) et dans l'infiniment petit (entropie des systèmes quantiques)



L'entropie est une propriété **émergente** : elle ne peut être définie qu'à l'échelle macroscopique.

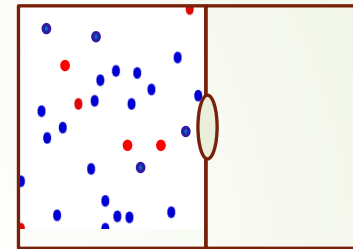
Hors **équilibre** ?

- Système un peu ordonné
- **Boltzmann** : le nombre de configurations est faible
- **Clausius** : une partie de l'énergie est récupérable

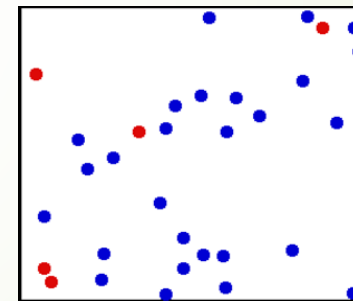
A l'**équilibre** :

- Système désordonné
- **Boltzmann** : le nombre de configurations est élevé
- **Clausius** : pas d'énergie libre

Entropie basse

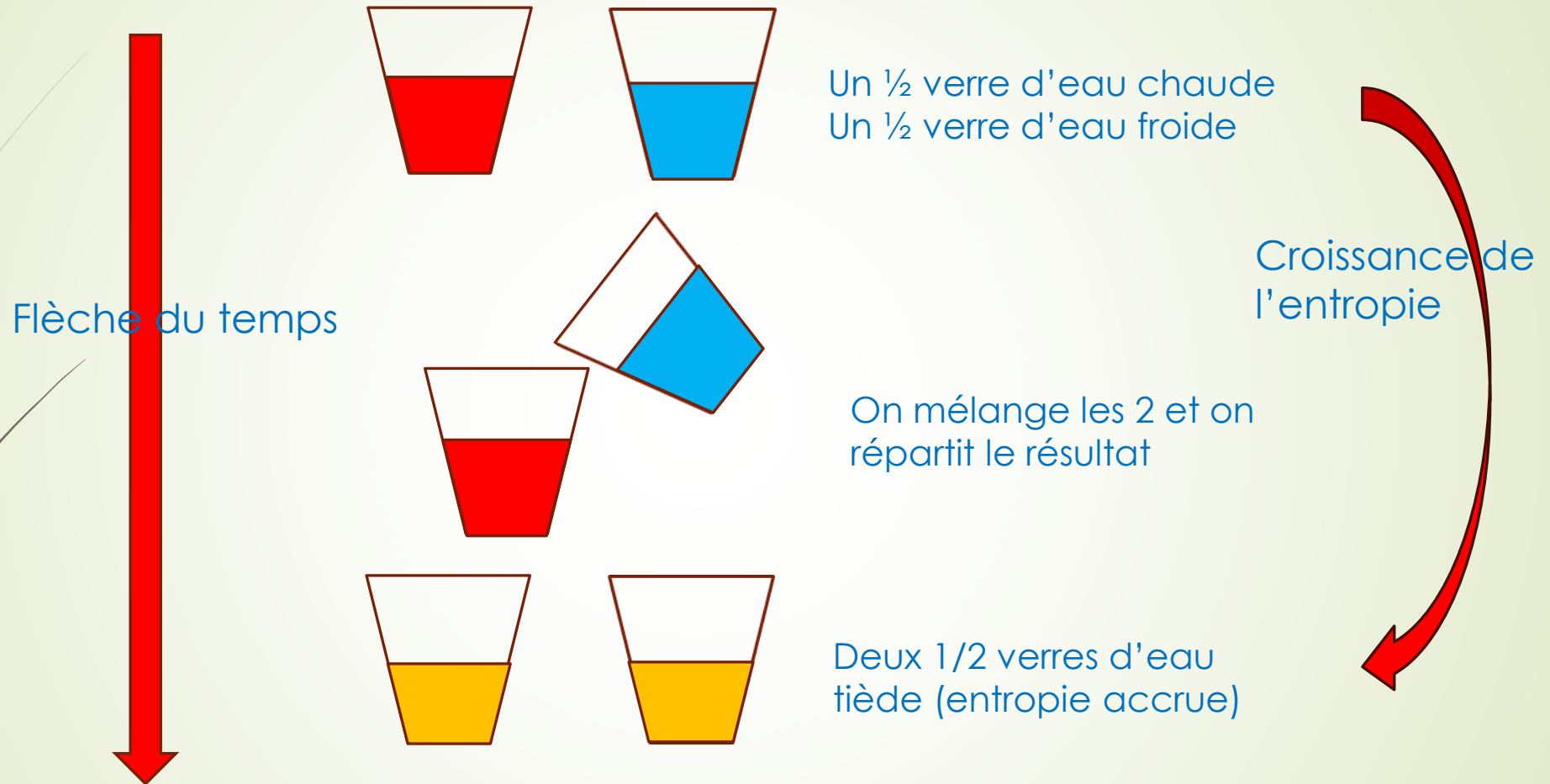


Entropie maximum



Croissance de l'entropie
→
Irréversibilité

La **flèche du temps** à notre échelle est une propriété liée à la croissance de l'entropie

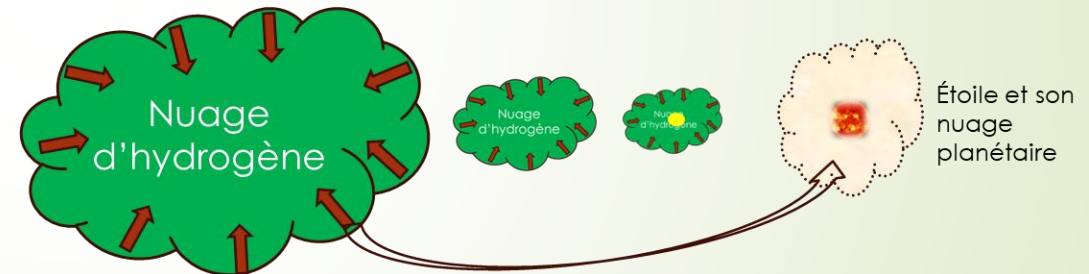


La croissance de l'entropie d'un **système isolé** traduit son évolution **irréversible** vers l'état le plus probable, à partir duquel il n'évoluera plus

En l'absence de forces, cet état est le plus **désorganisé**, celui pour lequel on a le **moins d'information** ; aussi associe-t'on la croissance de l'entropie à la **croissance vers l'état le plus désordonné****.

Paradoxe ?

La création d'une étoile par effondrement d'un nuage d'hydrogène correspond à une croissance de l'entropie (systèmes à pression négative)



** en général, mais la notion d'ordre dépend du contexte.



Mais

- Le temps est réversible en Mécanique quantique
- Le temps ne s'écoule pas de manière uniforme (relativité générale)

La « flèche du temps » : le temps semble s'écouler toujours dans le même sens (Eddington 1927)

Vrai pour les « grands systèmes », lié à la croissance globale de l'entropie.



Crédit <http://tecfu.unige.ch>

Le temps irréversible à l'échelle macroscopique est une propriété émergente (voir le cours « un peu de physique – autrement »)

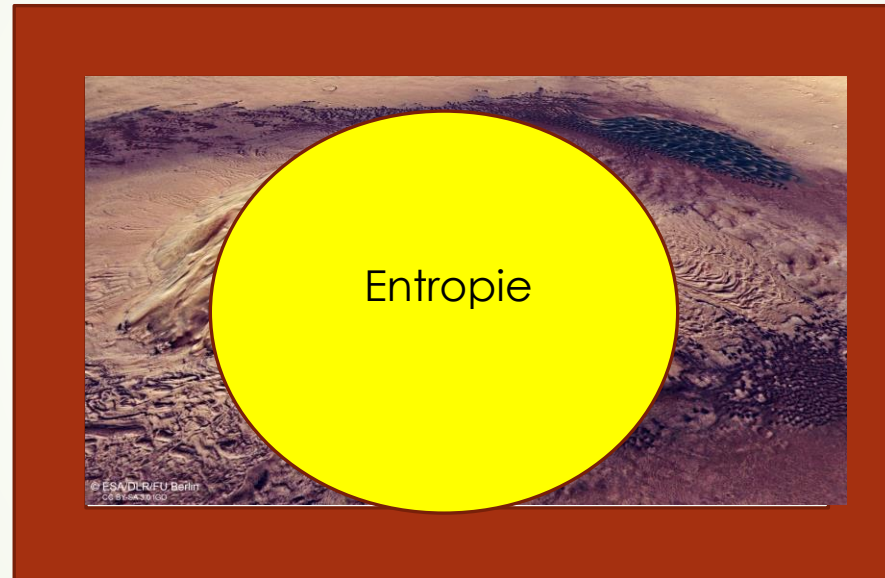
- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.
- Le taux de retour énergétique nécessaire à une société actuelle est de l'ordre de 7-15. Il est difficilement atteint pour la plupart des énergies en flux (éolien, voltaïque) avec stockage pour gérer l'intermittence.
- La densité énergétique (volumique, massique) des moyens de stockage est maximale (hors nucléaire) pour les carburants fossiles
- L'exploitation des énergies en flux (dispersées) implique une occupation de l'espace (visibilité) importante.
- L'entropie est une grandeur fondamentale qui caractérise les échanges d'énergie entre systèmes ; elle ne peut que croître.
- L'entropie caractérise la part de l'énergie d'un système non immédiatement mobilisable pour des transformations (énergie thermique) ; le complément est l'énergie libre.
- **La croissance irréversible de l'entropie d'un système isolé traduit son évolution vers un équilibre à partir duquel il n'évoluera plus ; dans la plupart des cas, c'est l'état le plus désordonné.**

L'entropie
Ordre et morphogénèse

Le Second principe de la thermodynamique

2^{ème} principe de la thermodynamique

L'entropie d'un système isolé ne décroît jamais : elle croît jusqu'à une valeur maximale



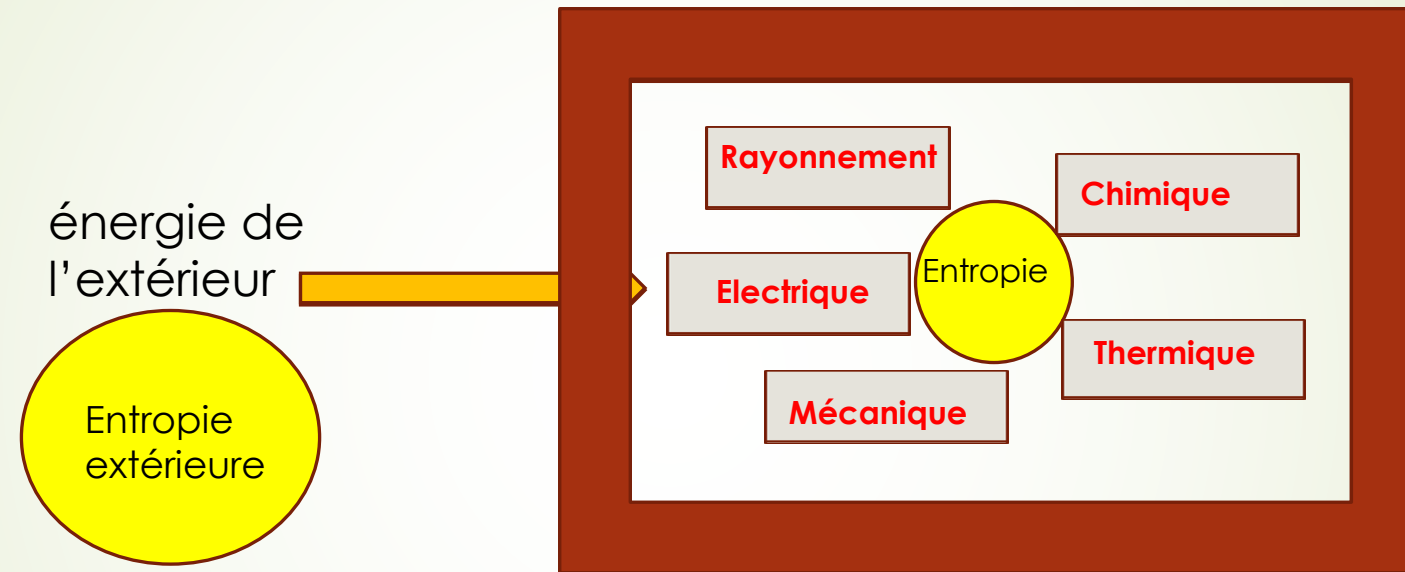
By Simon Koopmann -
commons.wikimedia.org
ESA/DLR/FU

Le système isolé va évoluer en augmentant son entropie (se désorganisant) jusqu'à un maximum où il n'évoluera plus

Conséquences du second principe de la thermodynamique

69

Pour diminuer l'entropie d'un système fermé (**non isolé**) ; il faut lui fournir de l'énergie

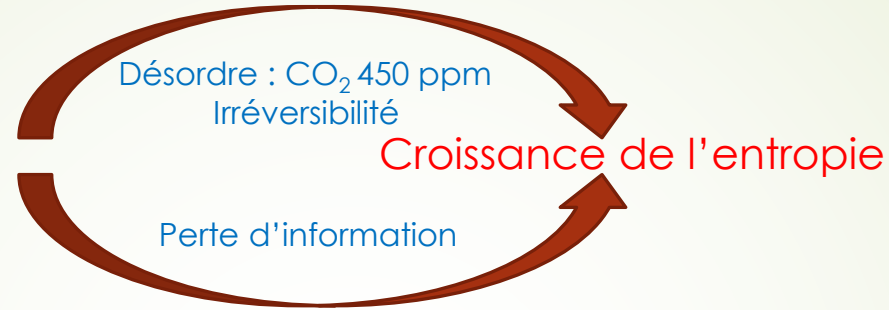


Le système peut évoluer en maintenant (ou diminuant) son entropie ; mais son **environnement** **paye (et plus) la facture de l'entropie** interne « économisée »

Autre formulation du 2nd principe de la thermodynamique
« *Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale incluant l'entropie du système et celle du milieu extérieur* »

2025 - 2026

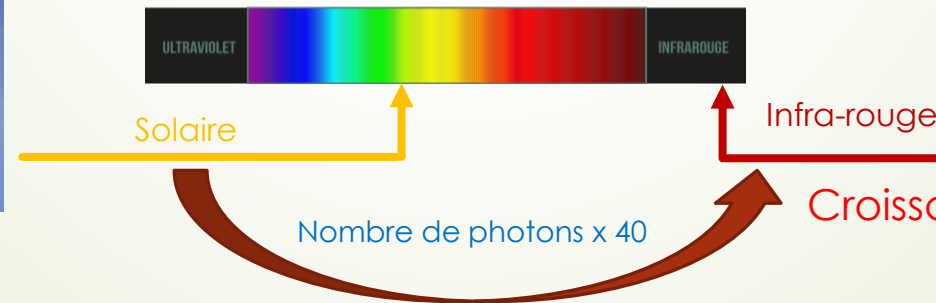
Emission de CO₂



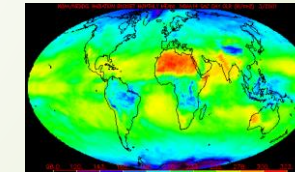
Tri sélectif des déchets



Rayonnement



<http://psbgsi1.nesdis.noaa.gov/>



Croissance de l'entropie

Les signatures de l'entropie

71

Énergie



Création d'entropie

Baisse d'entropie

Signatures des processus entropiques :

- Création de désordre
- Difficilement réversibles
- Nécessitent de l'énergie pour les inverser

Un corps humain

Élément	% en masse	Masse (kg)	nombre d'atomes
Hydrogène	10%	7,0	62%
Oxygène	65%	43,0	24%
Carbone	18%	16,0	12%
Azote	3,00%	1,8	1,10%
Calcium	1,40%	1,0	0,22%

Quelle différence entre un corps humain et un tas d'atomes ?

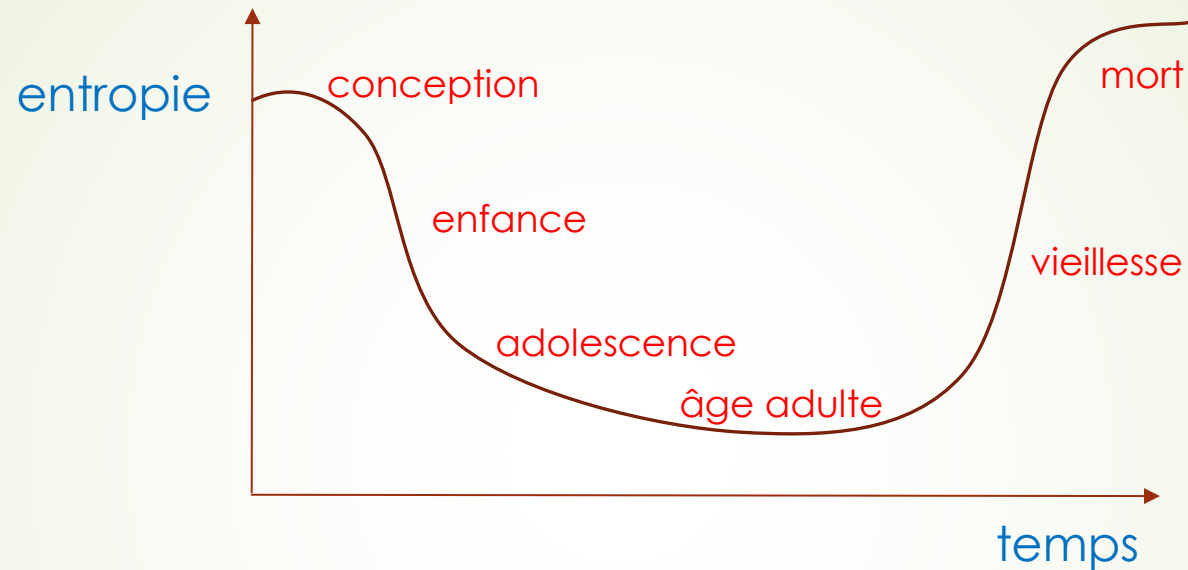


Wikipedia Venus Botticelli, David Michel-Ange

néguentropie

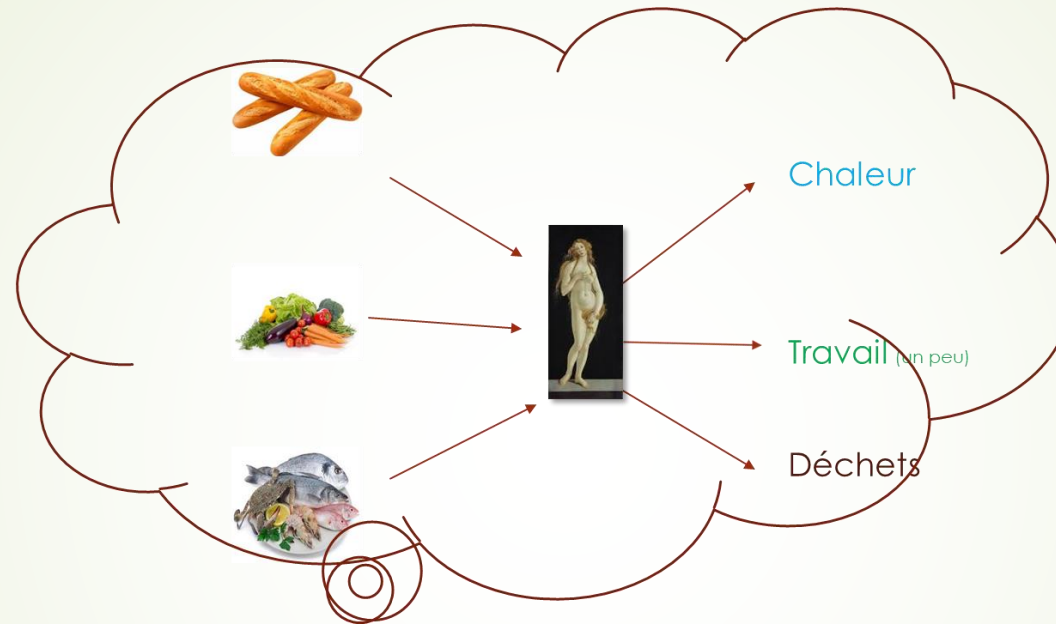
- Un organisme vivant : une structure extrêmement organisée des molécules qui le composent (système très ordonné)
- Donc un organisme vivant a une entropie très faible

Vision entropique de la vie



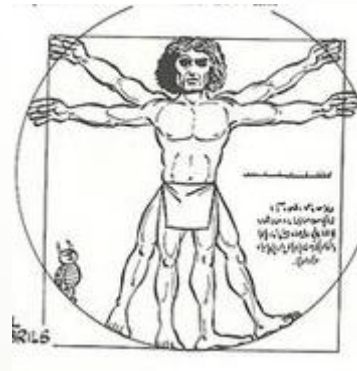
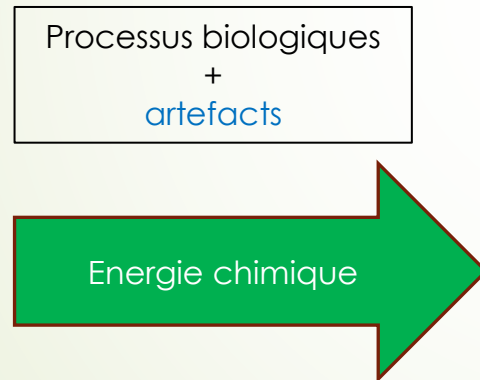
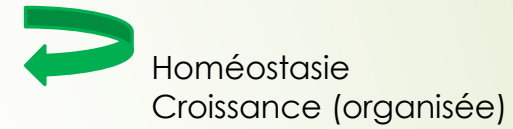
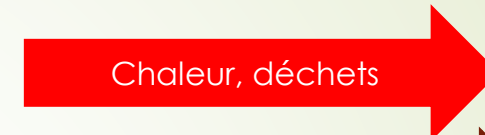
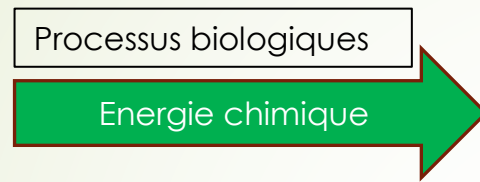
Un être vivant est une diminution locale et temporaire de l'entropie du monde

Au prix d'un apport d'énergie considérable (1 500 kcal/jour pendant 20 ans = $50 \cdot 10^6$ kJ = 15 jours d'ensoleillement sur 1 km²)



L'environnement gagne en entropie (plus que) ce que la vie organisée en perd
L'environnement paye en désordre (plus que) ce que la vie gagne en ordre

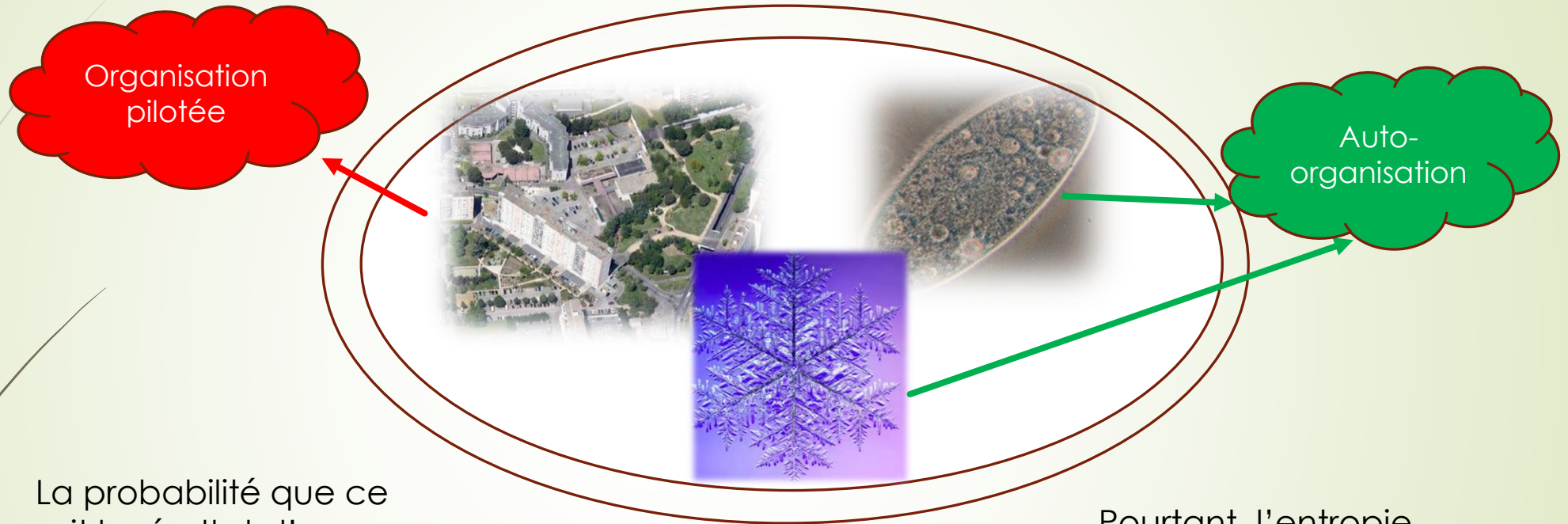
La vie : un processus de consommation d'énergie libre



Vitruve
Léonard de Vinci , Gotlib



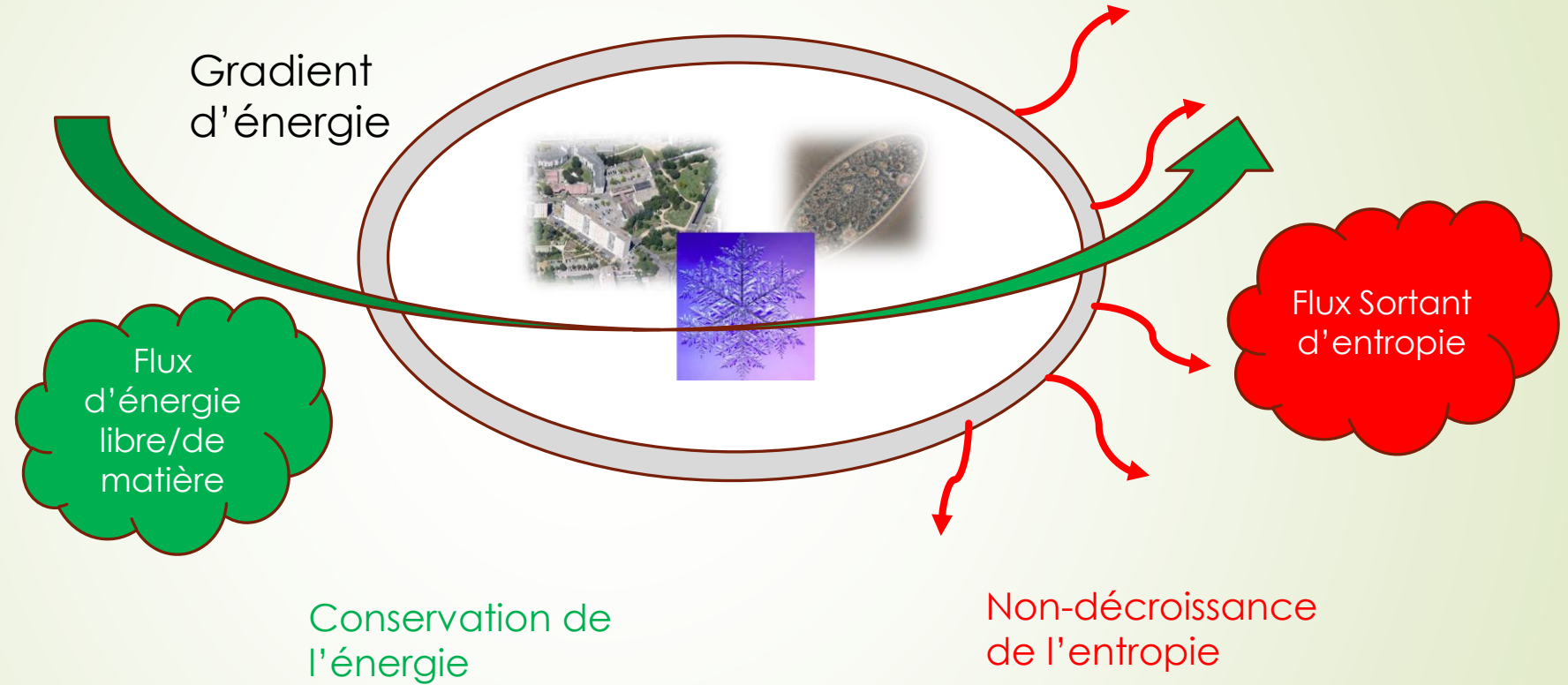
Une structure organisée correspond à une entropie basse



La probabilité que ce soit le résultat d'une organisation aléatoire est infiniment faible.

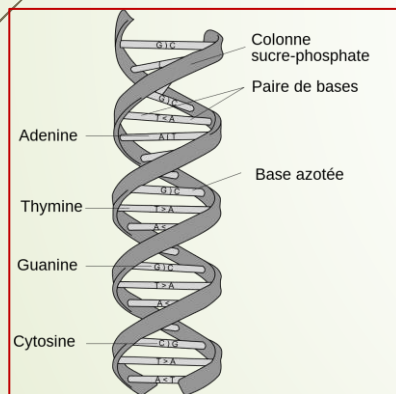
Pourtant, l'entropie (désordre) ne peut que croître

Une structure organisée correspond à une entropie basse



Stabiliser (ou diminuer) l'entropie d'un système nécessite un flux d'énergie

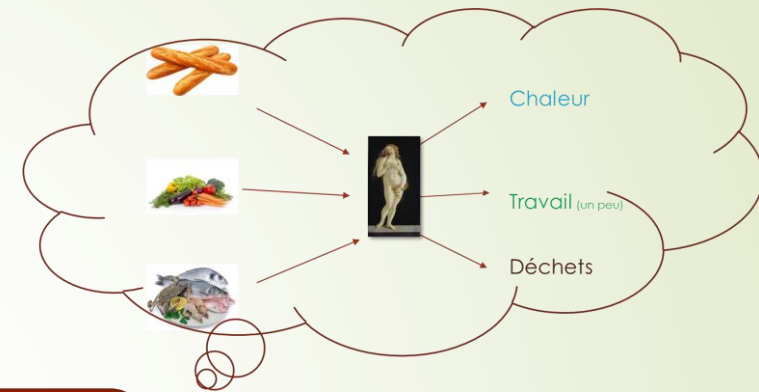
Un flux d'énergie permet de stabiliser l'entropie (maintenir l'ordre) dans un système

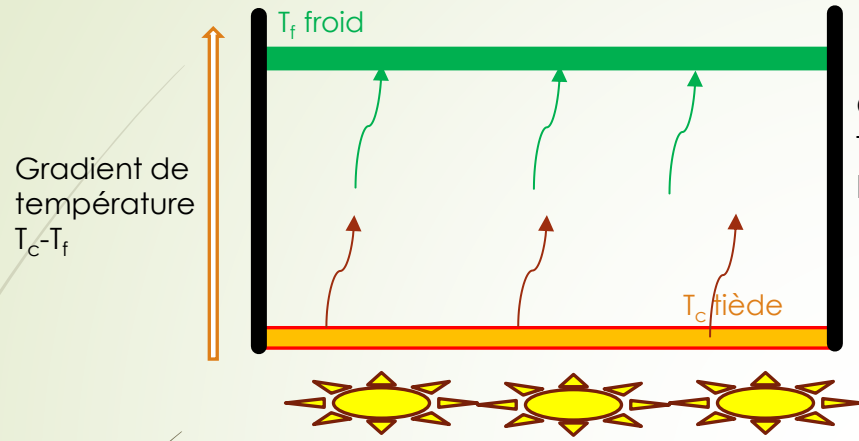


Wikipédia ADN

Quel(s) principe(s) gouverne(nt) la création d'ordre dans les systèmes ?

Microévolution \leftrightarrow macroévolution

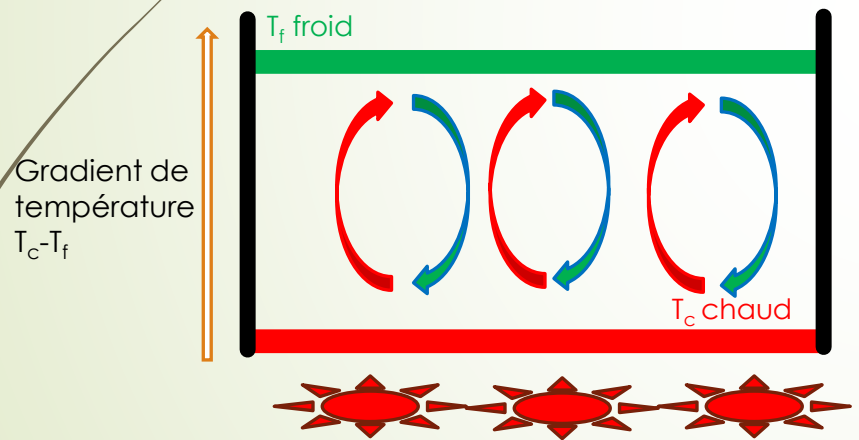




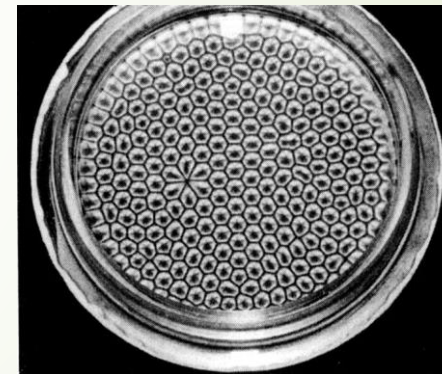
Gradient faible $T_c \approx T_f$
Transfert d'énergie par diffusion
Pas de mouvement collectif

Un exemple emblématique

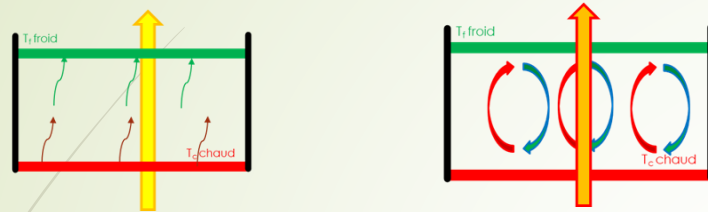
Cellules de Bénard
Organisation des molécules d'eau → baisse d'entropie



Gradient fort $T_c > T_f$
Transfert d'énergie par diffusion & convection
Mouvement collectif



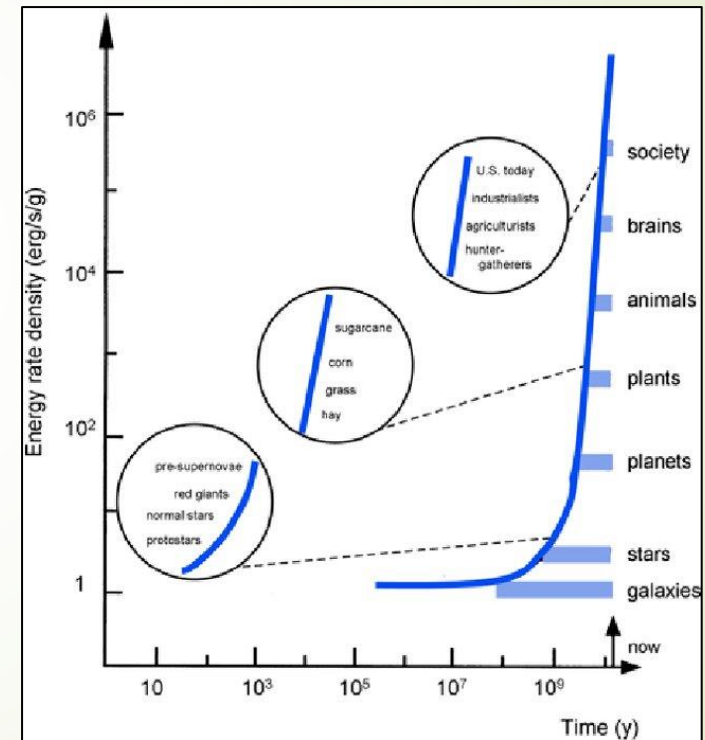
Gradient très fort $T_c \gg T_f$
Ébullition - Changement de phase - Turbulence



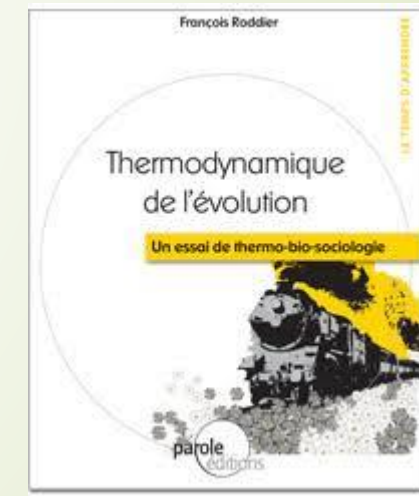
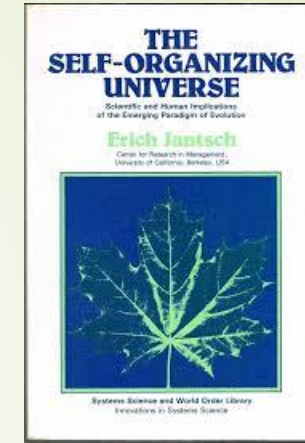
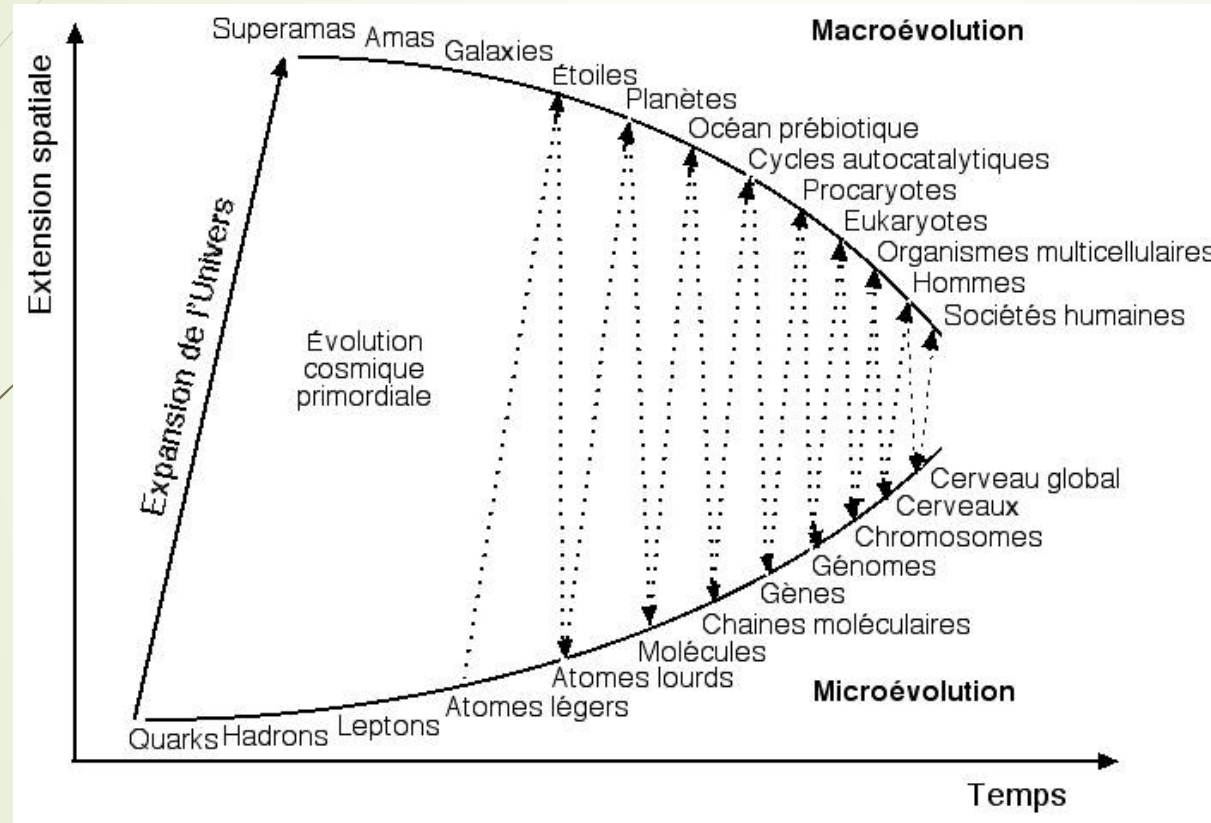
Les structures ordonnées sont créées pour augmenter l'efficacité du transfert d'énergie/entropie dans l'environnement

Mais quelle loi détermine les structures qui vont être créées ?

Principe de production maximum d'énergie/entropie (discuté)



Source [E.Chaisson](#)



- La distinction énergie primaire → secondaire → finale → utile est essentielle dans tout bilan
- La pérennité des sources d'énergie primaire va de quelques dizaines d'années (Gaz, pétrole) à plusieurs siècles (charbon)
- L'EROI (Energy Return On Investment – Taux de retour énergétique) donne la part de l'énergie nécessaire à sa production, le complément alimente les autres activités ; il va de 1 (biocarburants) à plus de cent (charbon, nucléaire) ; les sources en flux sont à un niveau intermédiaire.
- Le taux de retour énergétique nécessaire à une société actuelle est de l'ordre de 7-15. Il est difficilement atteint pour la plupart des énergies en flux (éolien, voltaïque) avec stockage pour gérer l'intermittence.
- La densité énergétique (volumique, massique) des moyens de stockage est maximale (hors nucléaire) pour les carburants fossiles
- L'exploitation des énergies en flux (dispersées) implique une occupation de l'espace (visibilité) importante.
- L'entropie est une grandeur fondamentale qui caractérise les échanges d'énergie entre systèmes ; elle ne peut que croître.
- L'entropie caractérise la part de l'énergie d'un système non immédiatement mobilisable pour des transformations (énergie thermique) ; le complément est l'énergie libre.
- La croissance irréversible de l'entropie d'un système isolé traduit son évolution vers un équilibre à partir duquel il n'évoluera plus ; dans la plupart des cas l'état c'est l'état le plus désordonné.
- Un système peut stabiliser (diminuer) son entropie par un apport extérieur d'énergie ; mais au bilan, l'entropie totale de (système + environnement) augmentera.

Pour attribuer cette œuvre dans tout support dérivé en redistribution ou en adaptation ou modification dans le respect des conditions de licence libre et ouverte choisie par l'auteur :



«L'énergie dans tous ses états : caractériser les énergies»
Dans: Un peu de science pour comprendre le monde moderne. »,
par Bernard Remaud, 2026 (mars), est sous licence CC BY-SA 4.0.

D'autres ressources sont disponibles sur le blog
<https://un-peu-de-physique.fr/>



Pour aller plus loin sur l'énergie ?

Des vidéo conférences sur la chaîne YouTube : [la Science de Bernie](#)



Mon blog <https://un-peu-de-physique.fr/>
Des cours, des ressources...

Des podcasts sur Spotify : [La science de Bernie](#)



Des cours en ligne ou présentiels à l'Université
Permanente de Nantes : <https://up.univ-nantes.fr/>