

L'énergie dans tous ses états

B. Remaud

Faculté des Sciences – Nantes – Octobre 2024



<https://un-peu-de-physique.fr/>



La science de Bernie



La science de Bernie

L'énergie dans tous ses états

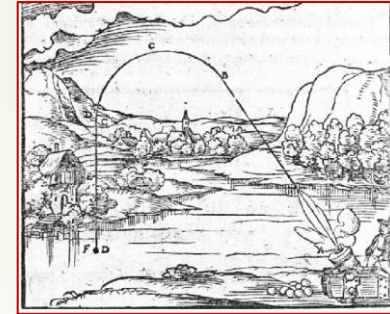




Il a fallu attendre les années 1850 pour répondre à cette question

Avant le XVII-XVIII^{ème} siècle, de multiples approches partielles :

- Le **phlogistique** : fluide pour expliquer la combustion
- Le **calorique** : fluide s'écoulant des corps chauds vers les corps froids
- La **force vive** : qu'un mobile « consomme » dans son mouvement
- ...



Bernoulli vers 1717

Travail d'une
force

Des idées ?
Conversion
conservation

Leibniz vers 1700

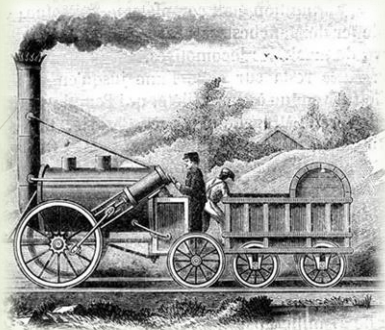
« Motrice » ou
potentielle

Leibniz vers 1700

Cinétique
 mv^2

Euler-Lagrange (vers 1760)

Énergie $E=T+V$
Action $L=T-V$



Chaleur $\leftrightarrow$ travail
Joule (1850)

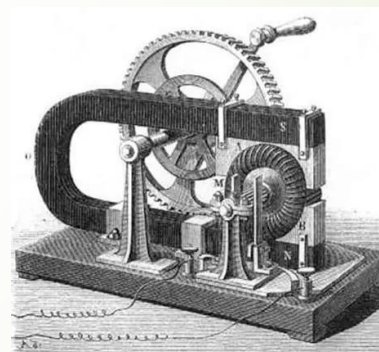
4,18 Joules $\rightarrow$ 1 calorie



Chimique $\leftrightarrow$ Electrique
Volta (1800)
Nicholson (1800)



Etc.



électrique $\leftrightarrow$ travail
Oersted (1820)
Faraday (1831)

5

Une loi universelle (1850, 1905)

À toutes les échelles (de l'Atome à l'Univers)
l'énergie est toujours conservée



L'énergie n'est pas
produite
Elle est transformée



De son origine jusqu'à sa fin, l'Univers conservera la même quantité d'énergie

- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps

De quoi l'énergie est-elle le nom ?

Etienne Klein

Énergie

« Quantité numérique **qui ne change pas** lorsque quelque chose arrive » (Richard Feynman)



Énergie

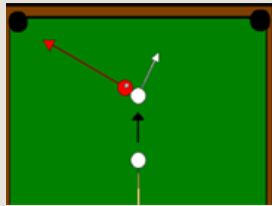
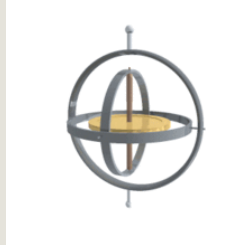
Capacité à d'un système à évoluer et/ou agir sur son environnement : effectuer un travail, donner du mouvement, changer l'état de la matière, varier la température, ...

Théorème de Noether Emmy Noether (1918)

A toute transformation qui laisse **invariant le lagrangien** d'un système, correspond une constante (une grandeur conservée)

Exemple : le Gyroscope

Invariant par rotation autour d'un axe →
Orientation dans l'espace conservée
(conservation du moment cinétique)



Mais aussi : la charge
électrique, l'impulsion, le spin,
etc...

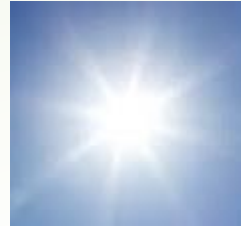


La conservation de l'énergie est liée à l'invariance par translation dans le temps des lois de la physique

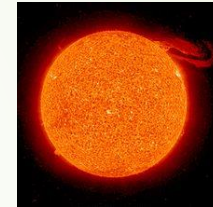
- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.

Les différentes formes d'énergie à notre échelle (2020)

La nourriture,
une pile



La lumière



Le Soleil

Le courant
électrique



Ces « objets »
ont une
propriété en
commun
qu'ils peuvent
échanger

Une chute
d'eau



Une casserole
d'eau bouillante

Les énergies à notre échelle

11

Chimique

Pétrole, bois, poudre,
Accus, piles,
Aliments



Electrique

Courants électriques



Radiative

Lumière
Infrarouge
Rayons X
Ondes radio...



Thermique

Chaleur



Nucléaire

Fusion (étoiles, bombe H)
Fission (centrales, bombe A)

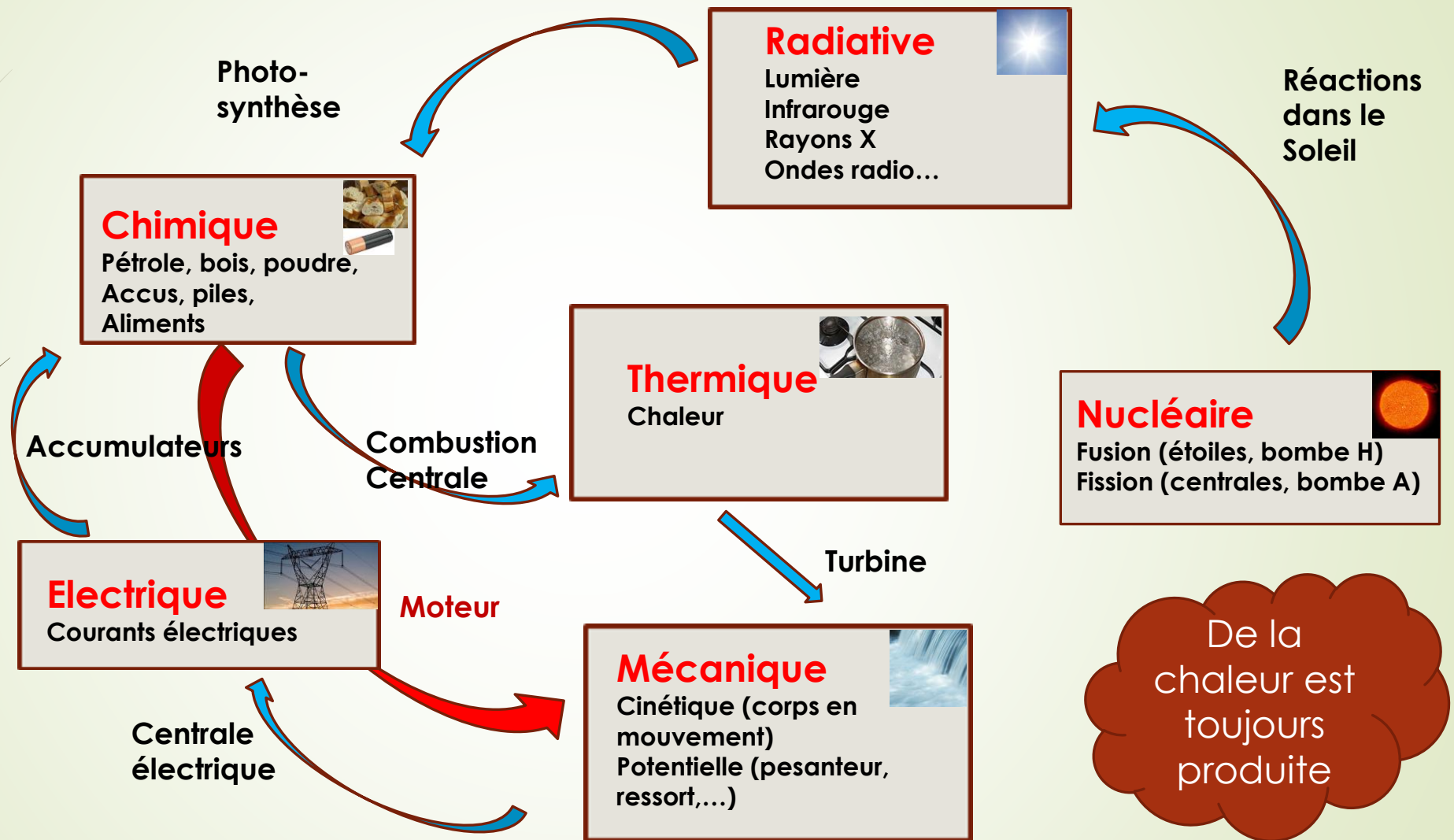


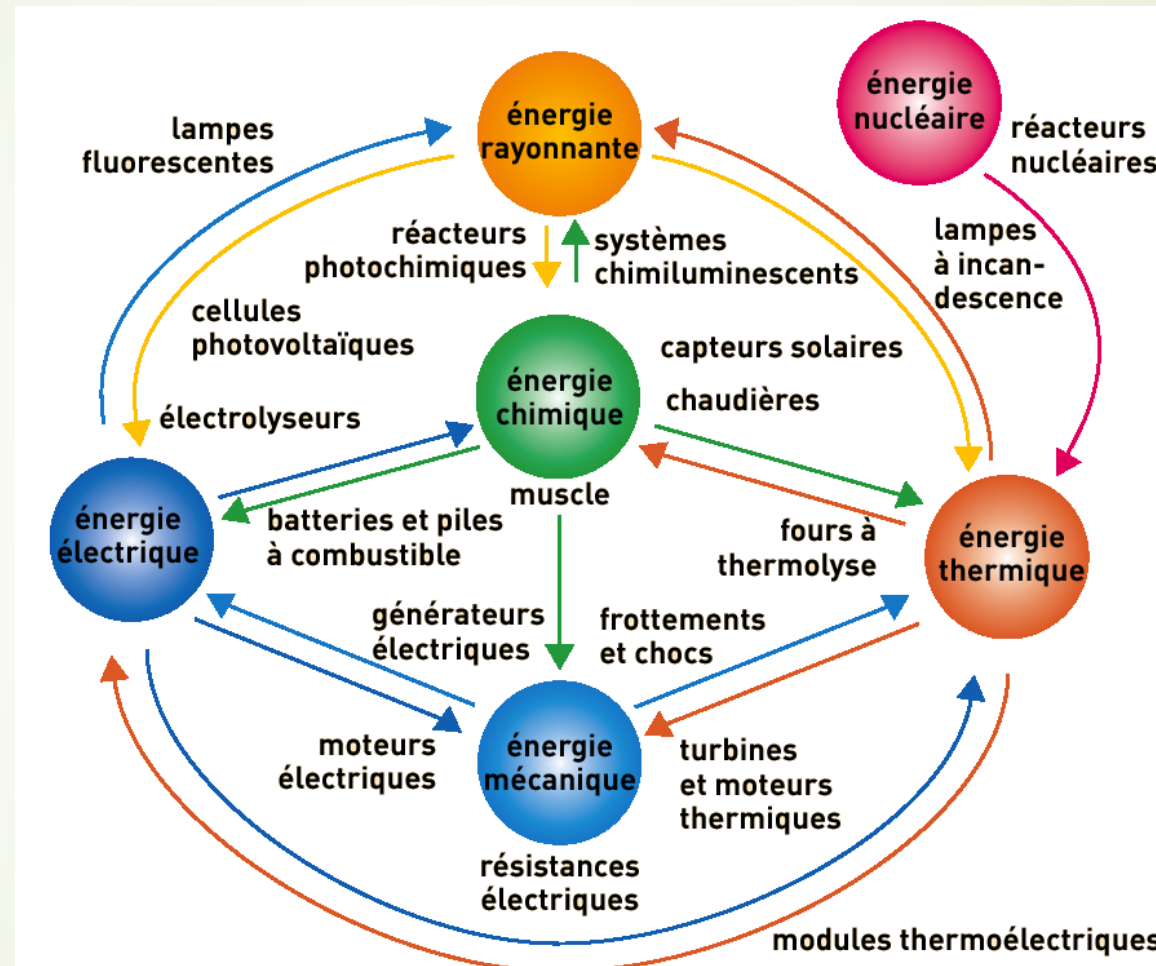
Mécanique

Cinétique (corps en
mouvement)
Potentielle (pesanteur,
ressort,...)



Les énergies se transforment – la voiture électrique(en Pologne)





Energieplanete.fr

- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres

Pourquoi certaines conversions sont plus faciles que d'autres ?

Pourquoi la chaleur apparaît-elle dans toutes les conversions ?

La clé est dans l'infiniment petit

Comprendre et gérer cette diversité des formes d'énergies à notre échelle



Ère de Planck $t < 10^{-42} s$

La quantité d'énergie de l'Univers est déterminée pour toujours

Densité d'énergie initiale

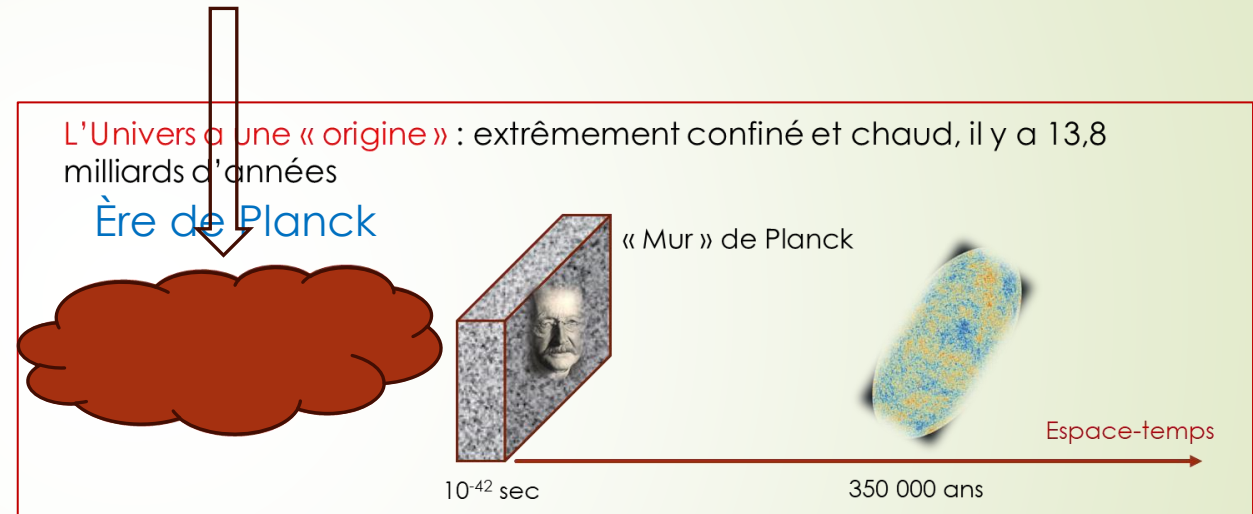
$$E_p = 46 \cdot 10^{112} \text{J(oule)}/m^3$$

La densité va décroître avec l'expansion de l'univers, mais le stock d'énergie ne changera pas

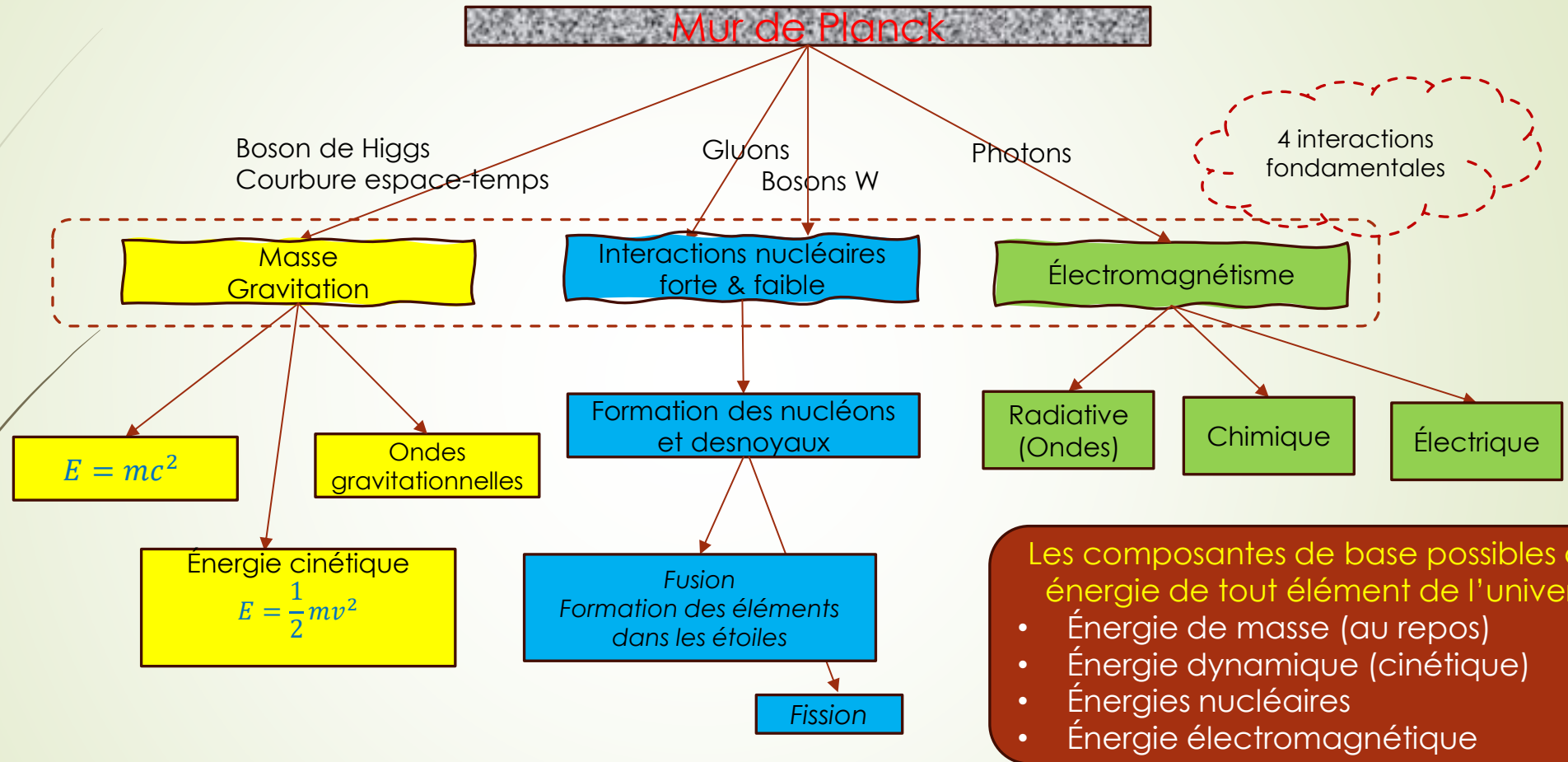
Densité estimée aujourd'hui

$$E_{\text{présent}} \sim 10^{-10} \text{J(oule)}/m^3$$

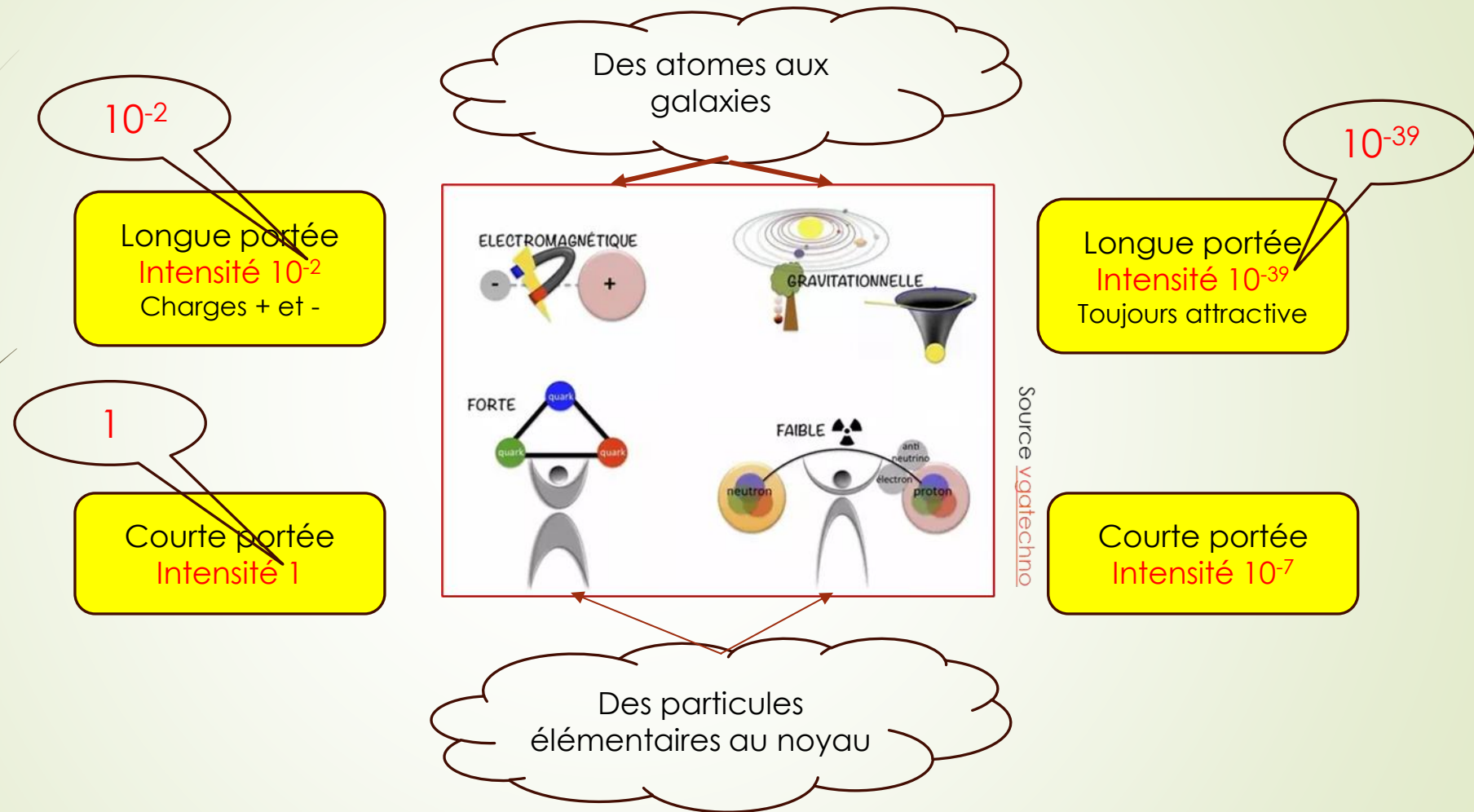
Le modèle du « Big Bang »
« Que l'énergie soit, et l'énergie fut »

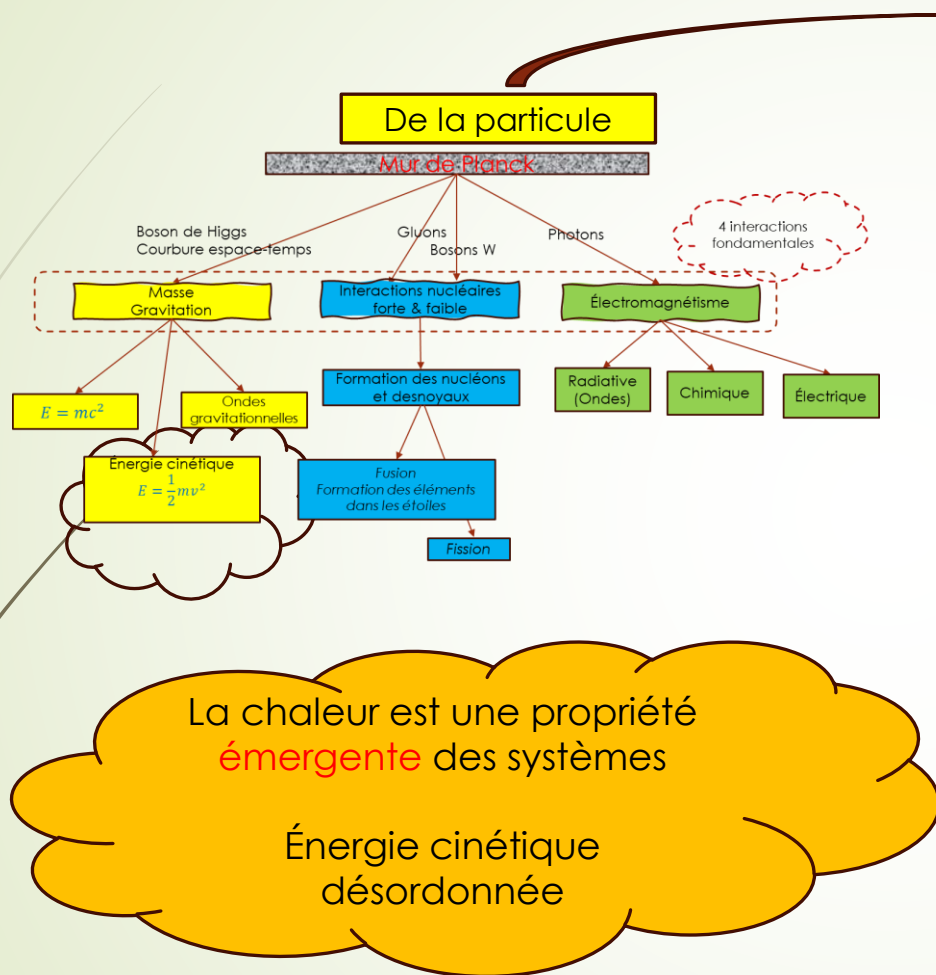


Voir la [vidéo](#) récente sur l'histoire de l'Univers



Les 4 interactions fondamentales





Aux systèmes de particules

Addition cohérente des interactions fondamentales

Cas particulier de l'énergie cinétique des composants

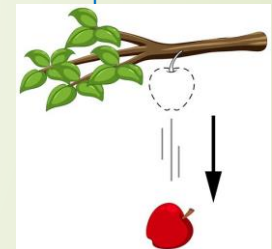
Énergie cinétique des molécules

Pomme cuite



Chaleur

pomme qui tombe



Énergie mécanique

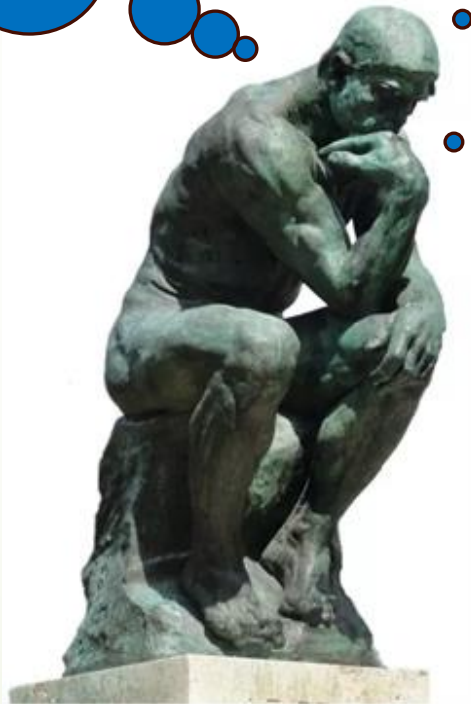
- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires

Lorsque l'on
passe des
particules aux
systèmes de
particules...

La chaleur :
propriété
émergente ?

Pourquoi les
corps chauds
émettent-ils des
ondes

Et l'entropie
?



Physique statistique classique

Formalisée au milieu du XIX^{ème} siècle par JC Maxwell pour l'étude **des gaz chauds**.

À la suite des chocs, les molécules ont une vitesse aléatoire déterminée par une loi de probabilité

$$f(v) \sim v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}}$$

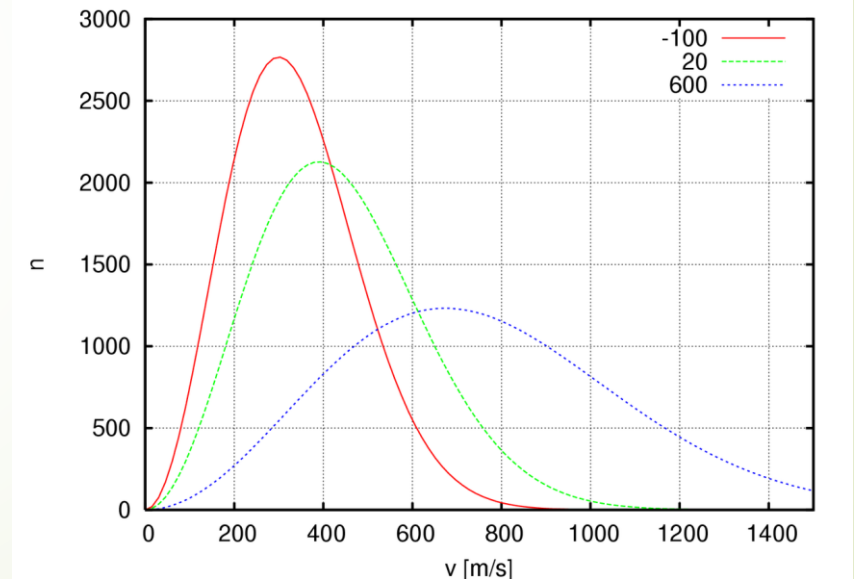
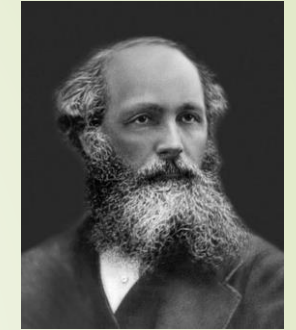
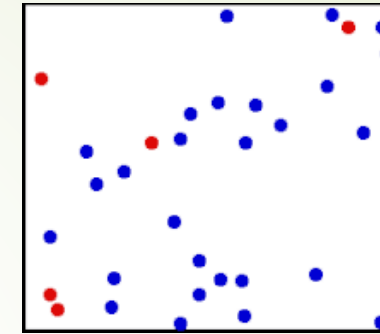
qui ne dépend que de la température T
(m est la masse des particules et k_B une constante)

Température liée à la vitesse moyenne des molécules

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

Chaleur = énergie cinétique de N molécules
(**mouvement désordonné**)

$$E_{\text{calorifique}} = \frac{3}{2} N k_B T$$

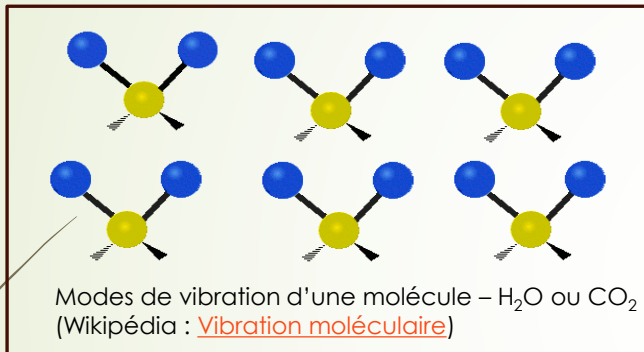


Distribution de la norme de la vitesse de molécules d'oxygène, à -100 °C , 20 °C et 600 °C ([Wikipédia](#))

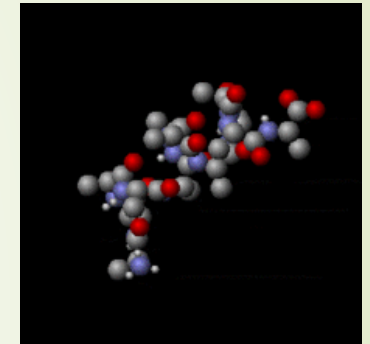


Physique quantique

Les atomes qui composent les molécules ont des modes collectifs (rotation, vibration) qui dépendent de la température



Le monde de l'infiniment petit est agité de **mouvements désordonnés** dont l'énergie (quantifiée) ne dépend que de la température.



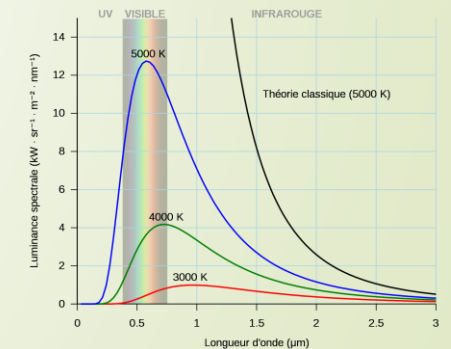
Un corps « noir » à une température T émet des ondes électromagnétiques dans tout le spectre (**Loi de Planck**):

$$L_{\Omega, \nu}^{\circ}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

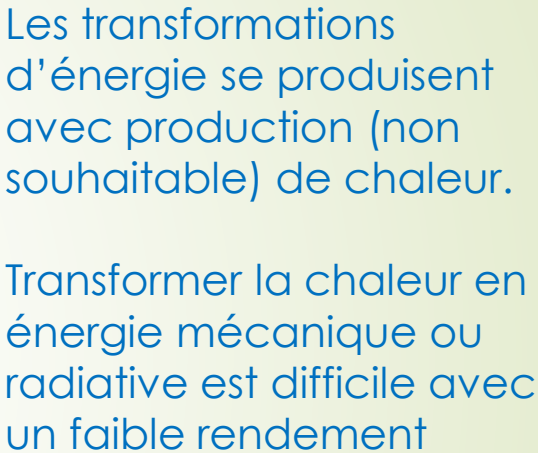


Les couleurs du fer chauffé

Le travail du métal

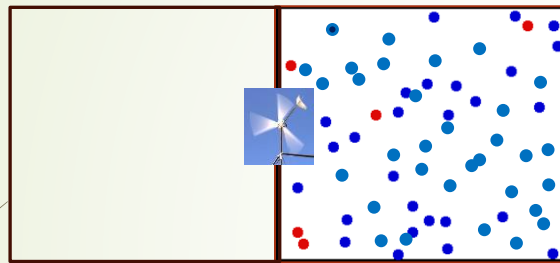


- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires
- Dans les systèmes composites, la chaleur est une propriété émergente liée à l'agitation désordonnée des composants élémentaires



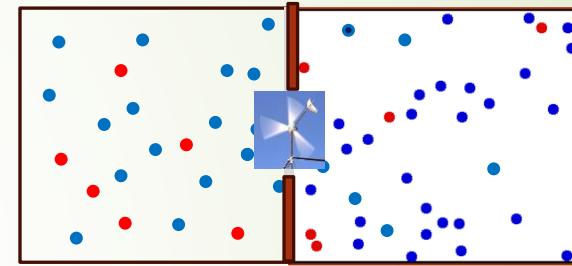
Un paramètre « caché » : l'entropie

Capacité à produire
énergie mécanique



Capacité à évoluer
→ Entropie basse

Aucune production
possible



Système à l'équilibre
→ Entropie maximale

L'entropie s'accroît

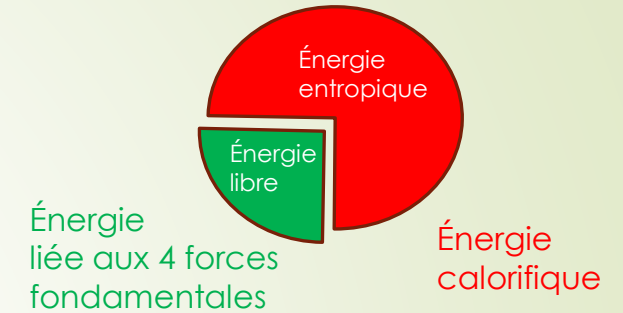
Irréversibilité

L'entropie S caractérise la part de l'énergie qui n'est plus disponible pour faire évoluer le système

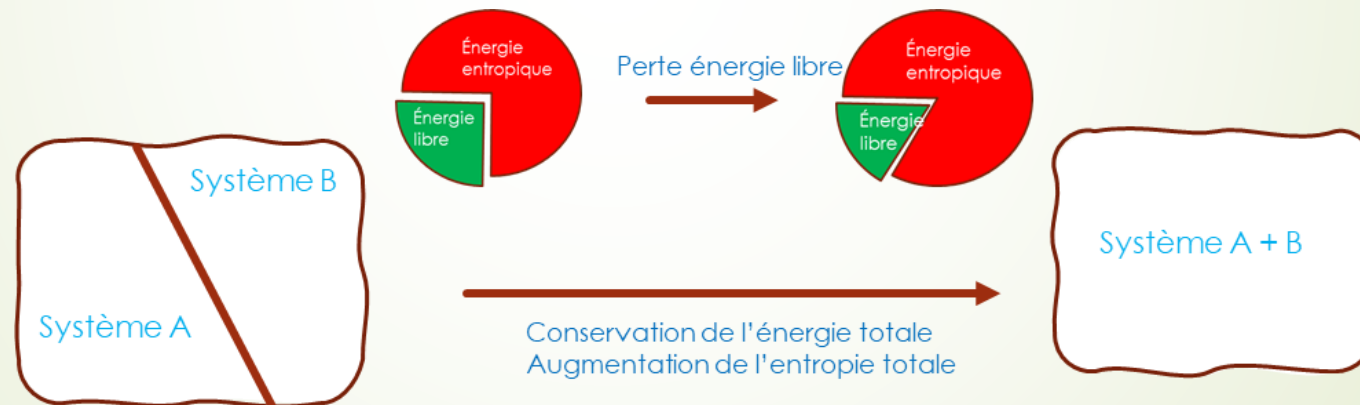
$$E_{\text{libre}} = E_{\text{totale}} - T \times S$$

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



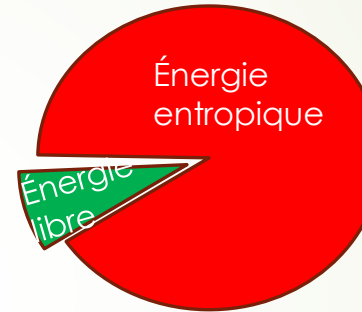


Énergie
entropique

Air calme

- Énergie totale 50 Wh/m³
- Énergie libre 0 (aucune énergie libre)

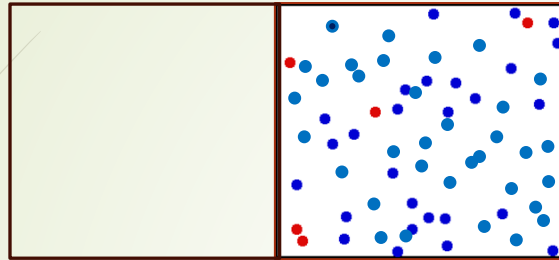
entropie maximum



Vent

- Molécules d'air en agitation thermique (520 m/s) + déplacement collectif 10 m/s
- Énergie totale 52,5 Wh/m³
- Énergie libre 2,5 Wh/m³ (énergie éolienne)

→ entropie plus basse

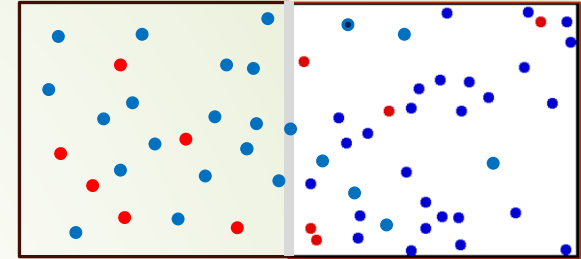


Capacité à évoluer
→ Entropie basse
 Ω_i états possibles

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

La croissance de
l'entropie traduit la
tendance d'un système
à aller vers son état le
plus probable



L'état le plus
probable étant (en
général) l'état le plus
désordonné

Le principe et ses corollaires

- L'entropie d'un **système isolé** croît toujours, jusqu'à un maximum à partir duquel le système n'évolue plus
- Toute transformation d'énergie se fait avec **augmentation de l'entropie**
- La chaleur est la forme **la plus dégradée** (plus désorganisée) des types d'énergie
- L'entropie est liée à la **flèche du temps** macroscopique



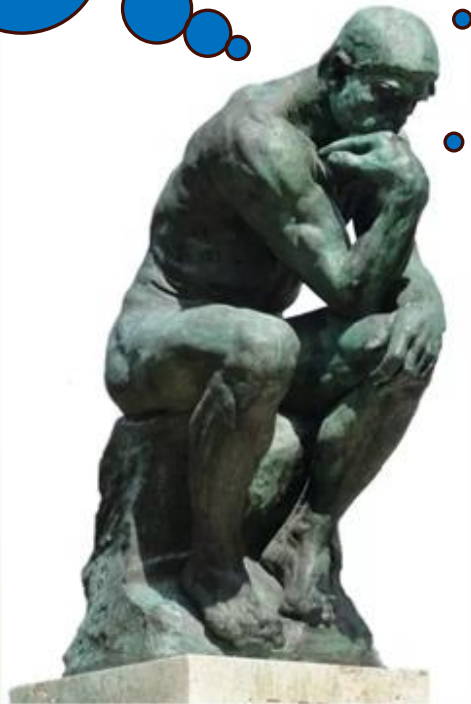
- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires
- Dans les systèmes composites, la chaleur est une propriété émergente liée à l'agitation désordonnée des composants élémentaires
- L'entropie est une autre grandeur émergente des systèmes, elle caractérise le degré de désordre de l'énergie cinétique des composants ; dans les systèmes isolés et lors des conversions d'énergie, l'entropie croît toujours.

Caractériser les
énergies à notre
échelle

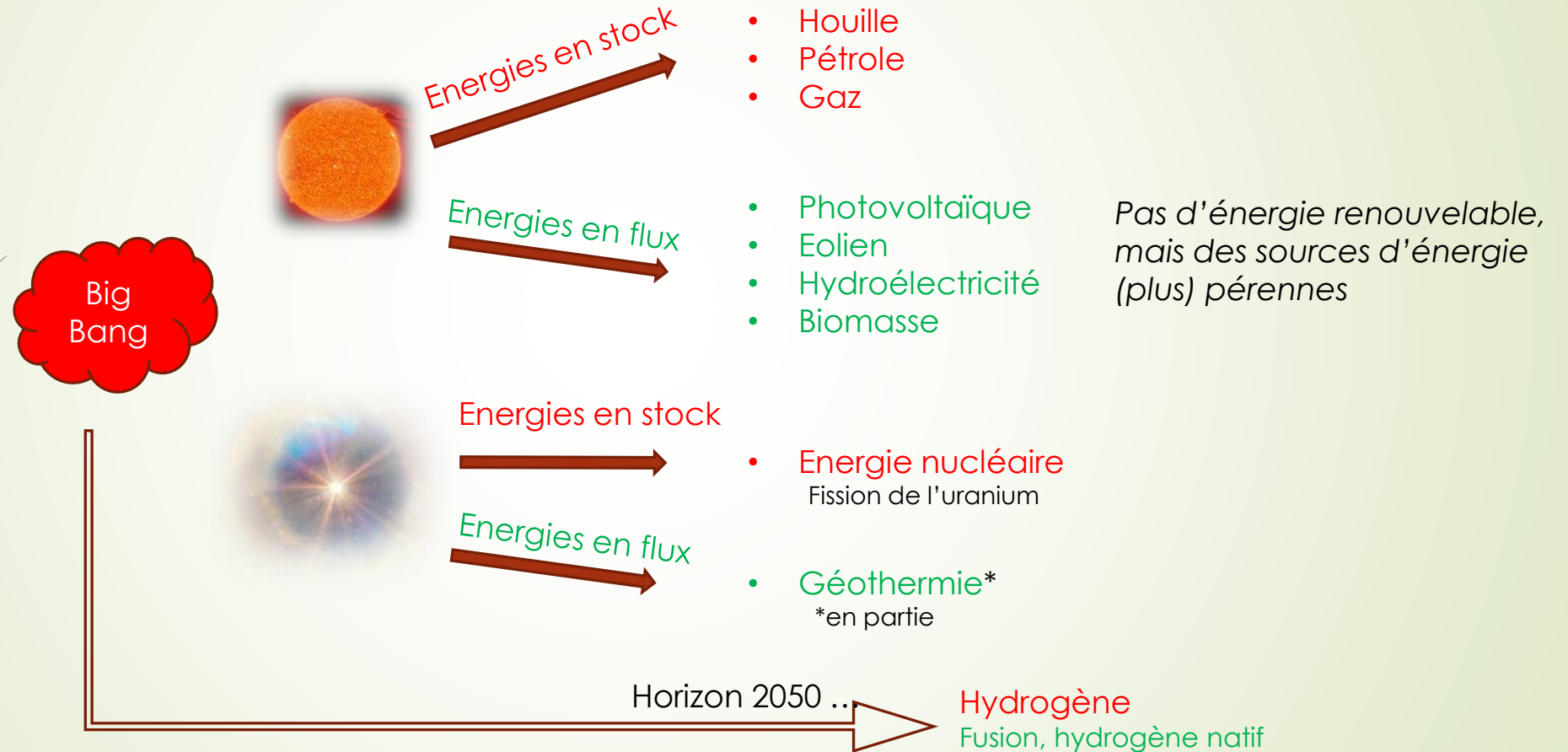
Et l'homme
et ses
activités ?

Quel bilan pour
la planète Terre
?

Et notre
Univers,
comment
va-t-il finir ?



Le Soleil est la source de 99% de l'énergie que nous utilisons



Comparons les énergies de ces 5 systèmes :



Un petit déjeuner
(500 kcal)



Un camion de 12
tonnes roulant à
65 km/h



6 litres d'eau
portée de 20 à
100°



Un rocher d'une
tonne à 200 m de
hauteur



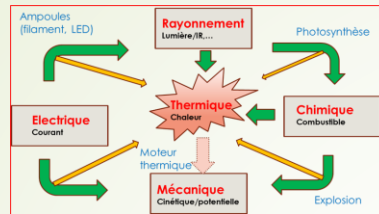
½ verre (6cl)
d'essence

Leur énergie est identique
2 Mégajoules (1 MJ = 10^6 Joules)
Soit l'équivalent de 0,025 microgrammes
d'uranium (ou toute autre matière)

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 non mature

Source Wikipedia - Densité massique d'énergie

Les signatures de l'entropie dans les « productions » d'énergie



Toute transformation crée de l'entropie :

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

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



Energie électrique

Énergie mécanique

Chaleur



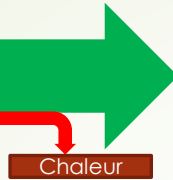
Energie chimique

Chaleur
Vapeur
gaz

Signatures de l'entropie

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

Energie mécanique
(potentielle)



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/>



Énergie
électrique

Énergie
libre

Énergie
entropique

Un autre exemple : une centrale au charbon

Energie chimique

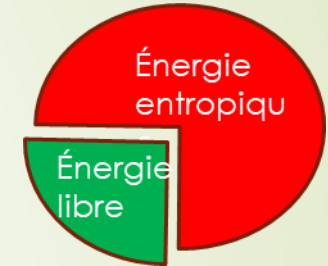
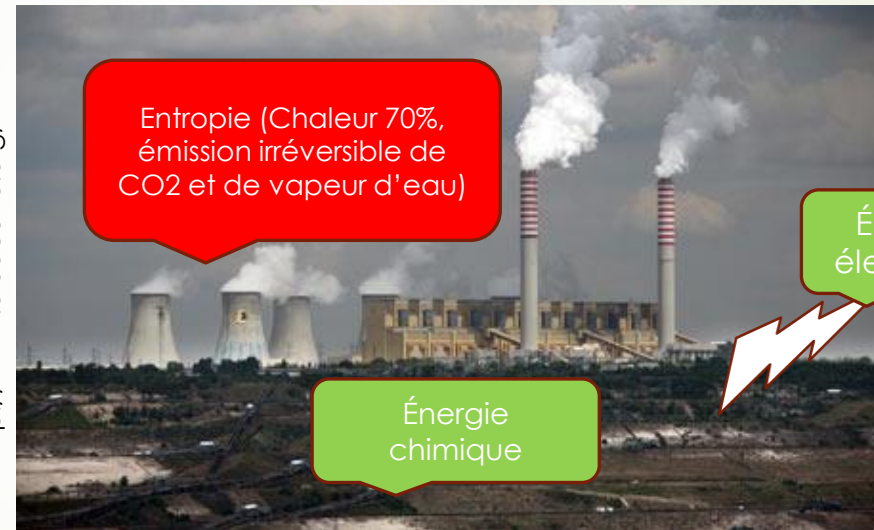
Chaleur
Vapeur
gaz

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/>



- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires
- Dans les systèmes composites, la chaleur est une propriété émergente liée à l'agitation désordonnée des composants élémentaires
- L'entropie est une autre grandeur émergente des systèmes, elle caractérise le degré de désordre de l'énergie cinétique des composants ; dans les systèmes isolés et lors des conversions d'énergie, l'entropie croît toujours.
- L'énergie libre est la part de l'énergie totale des systèmes qui n'est pas bloquée sous forme entropique (chaleur)



Charbon, pétrole et gaz → énergies chimiques à base de carbone

Le moteur thermique : la « pire » invention de l'Homo Sapiens

- Utiliser de la « chaleur » pour générer des énergies « nobles » (électriques, chimiques, etc.)
- Brûler du carbone → énergie en stock
- Émission **irréversible** de déchets (CO₂ dans l'atmosphère)



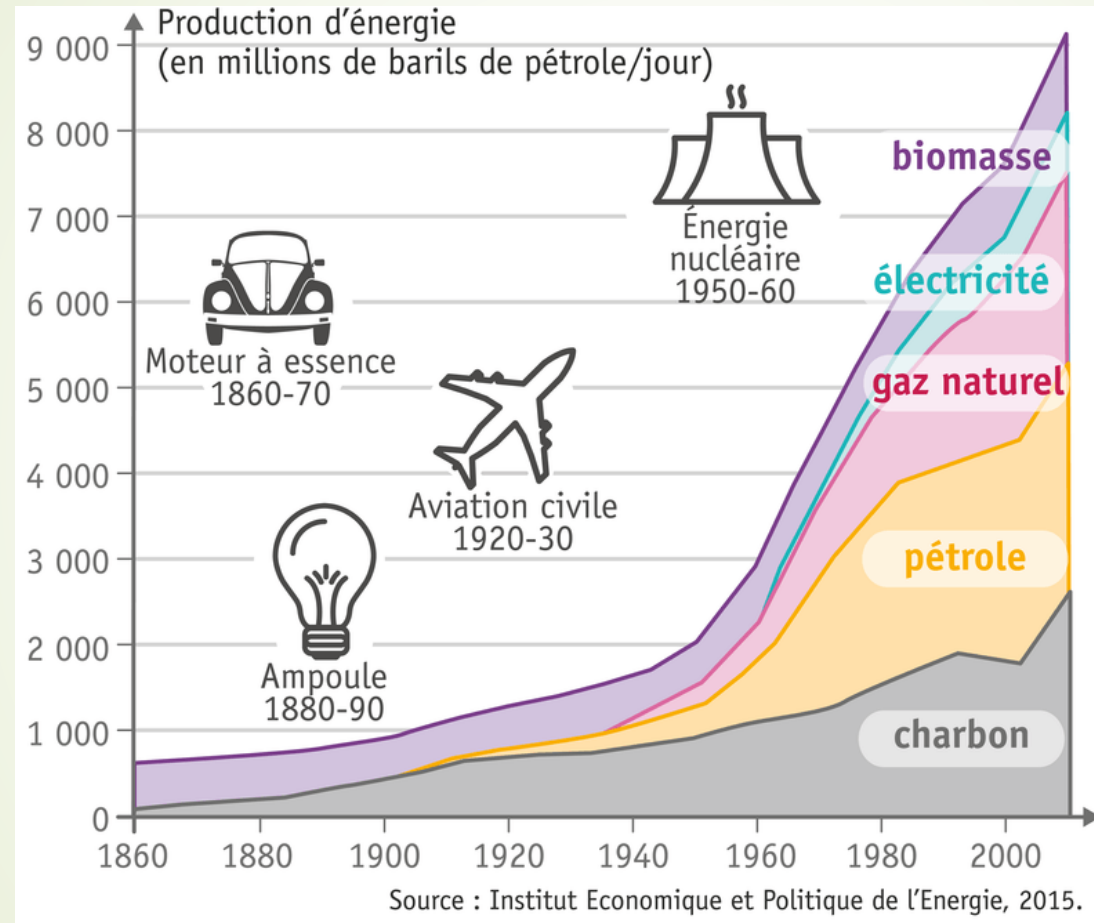
Carbone
Tas de charbon, localisé, non dispersé



Carbone dans l'atmosphère (CO₂)
Dispersé dans des milliards de m³

Taux d'émission de CO₂ ≈ Taux de création d'entropie

L'origine de la période industrielle



NB une incertitude de $\pm 50\%$ sur de telles données est admissible

Bep = Baril equivalent
pétrole
Production = 2 à 3 fois la
consommation

Environ

13 800 MTeP

160 10¹² kWh

par an(2018)

(<https://www.connaissancedesenergies.org>)

7, 5 milliards habitants (2017)

20 000 kWh

par an et par
habitant

Plus de 80% sur les stocks



L'humanité a le pouvoir de réguler le thermostat de la planète

Verre :

- « transparent » au rayonnement solaire (UV, visible) – 5 000°
- « opaque » au rayonnement infra-rouge – 300 °

Atmosphère terrestre :

- Oxygène (O₂), Azote (N₂), ... transparents aux Infrarouges
- CO₂, CH₄, NH₃, etc... absorbent les Infrarouges



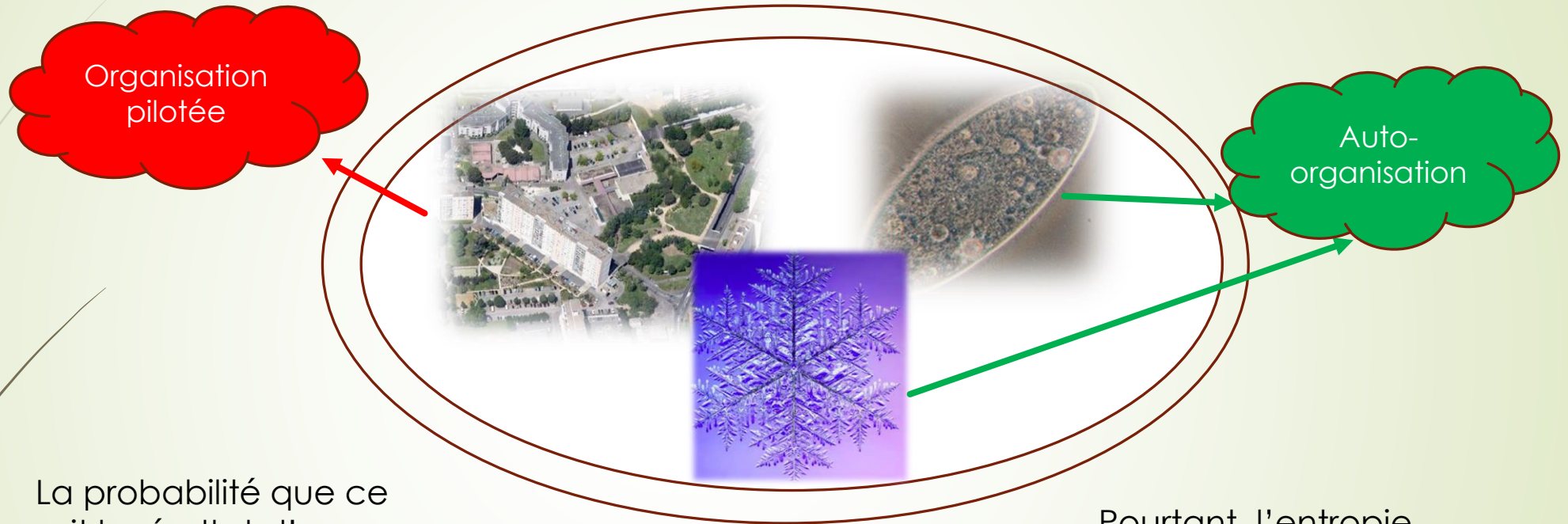
- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires
- Dans les systèmes composites, la chaleur est une propriété émergente liée à l'agitation désordonnée des composants élémentaires
- L'entropie est une autre grandeur émergente des systèmes, elle caractérise le degré de désordre de l'énergie cinétique des composants ; dans les systèmes isolés et lors des conversions d'énergie, l'entropie croît toujours.
- L'énergie libre est la part de l'énergie totale des systèmes qui n'est pas bloquée sous forme entropique (chaleur)
- Notre civilisation basée sur la combustion du carbone est très créatrice d'entropie (sans compter l'effet de serre)



Par Barfooz – Wikipédia -
paramécie



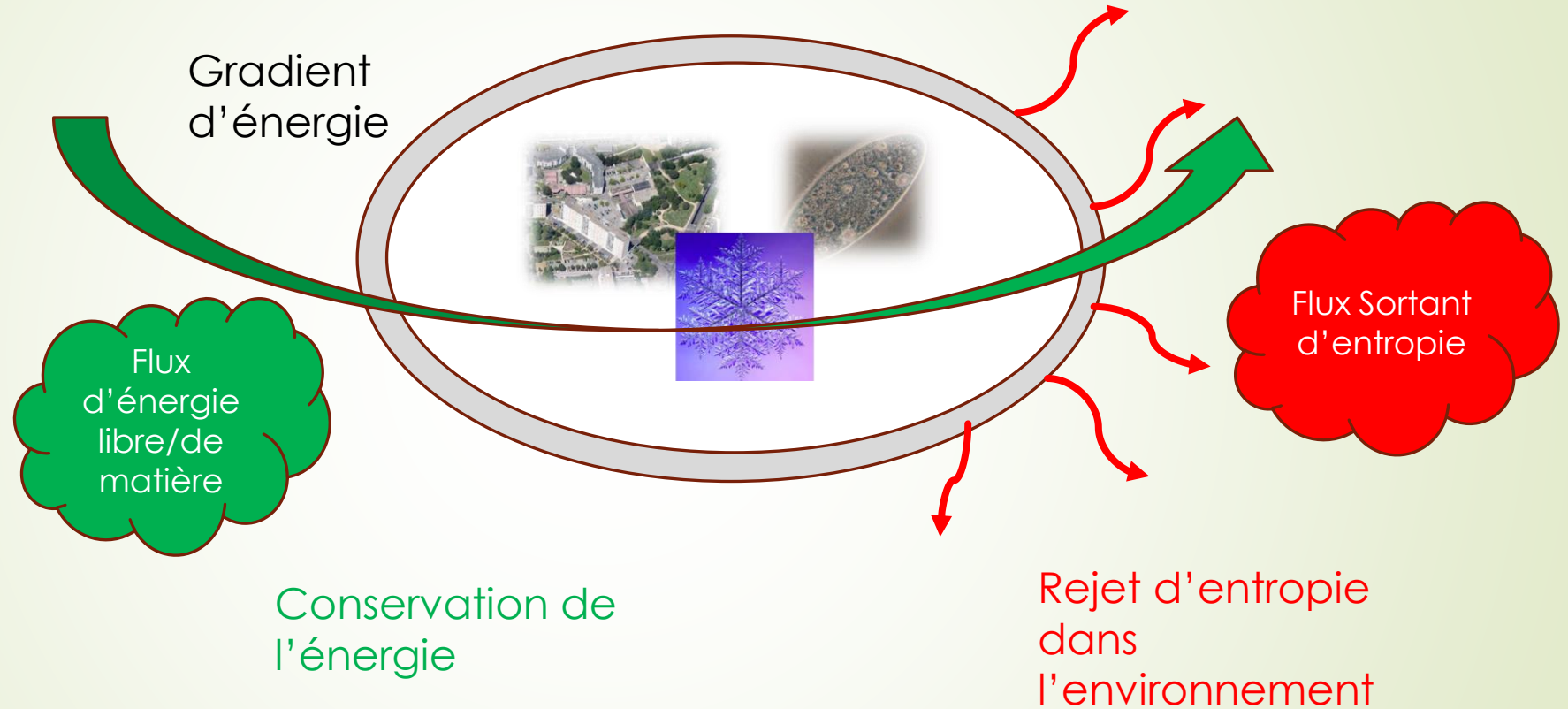
Une structure organisée correspond à une entropie basse



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



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 ?

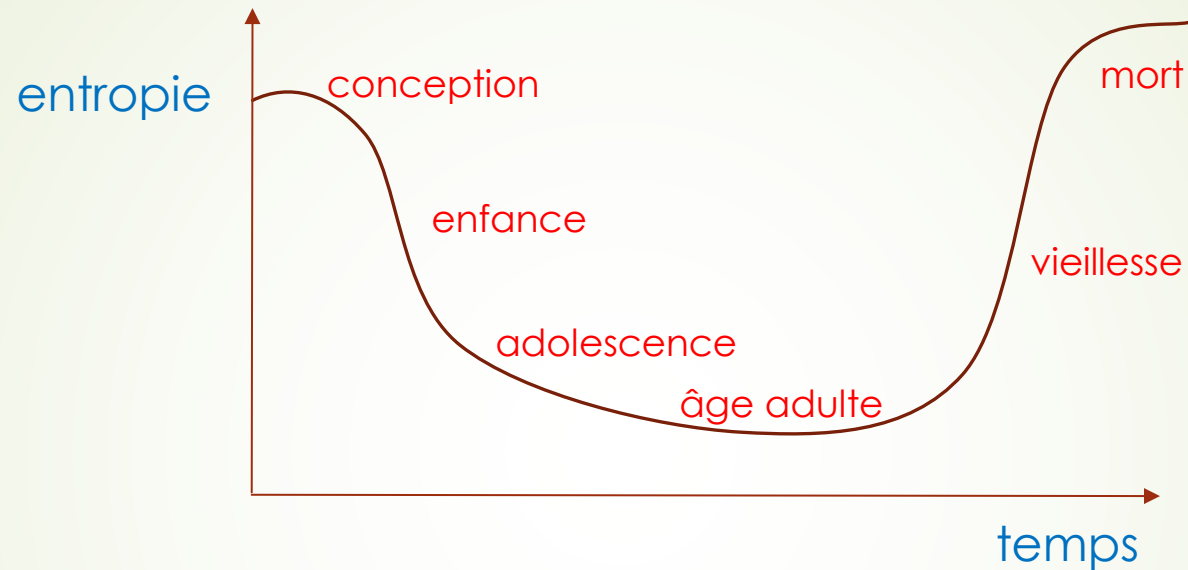


Wikipedia Venus Botticelli, David Michel-Ange

néguentropie

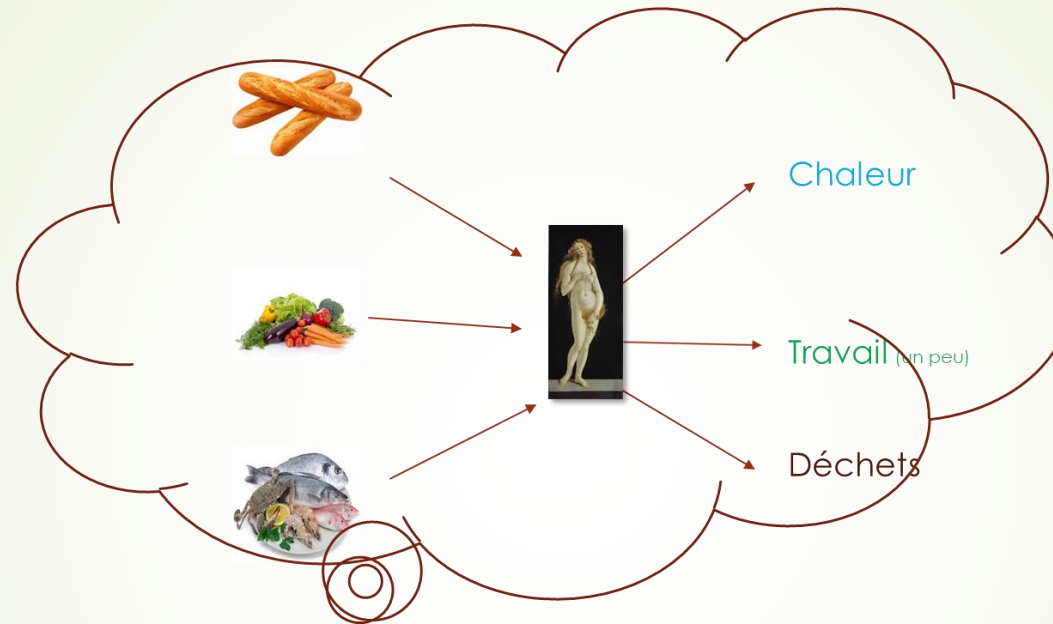
- Un organisme vivant : une structure extrêmement organisée des molécules qui le composent (système très ordonné)
- Donc un organisme vivant a une entropie très faible

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 = 50×10^6 kJ = 15 jours d'ensoleillement sur 1 km²)

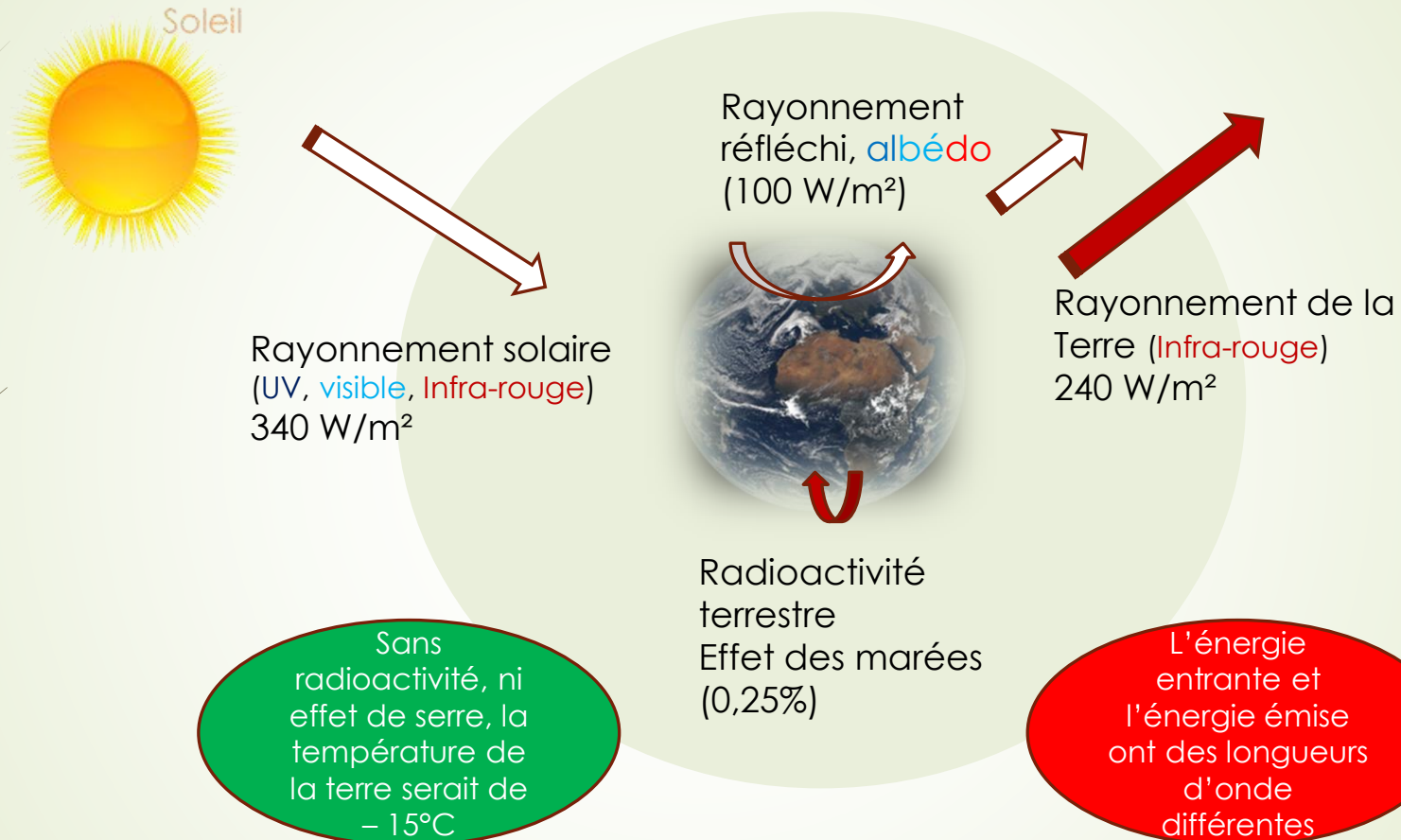


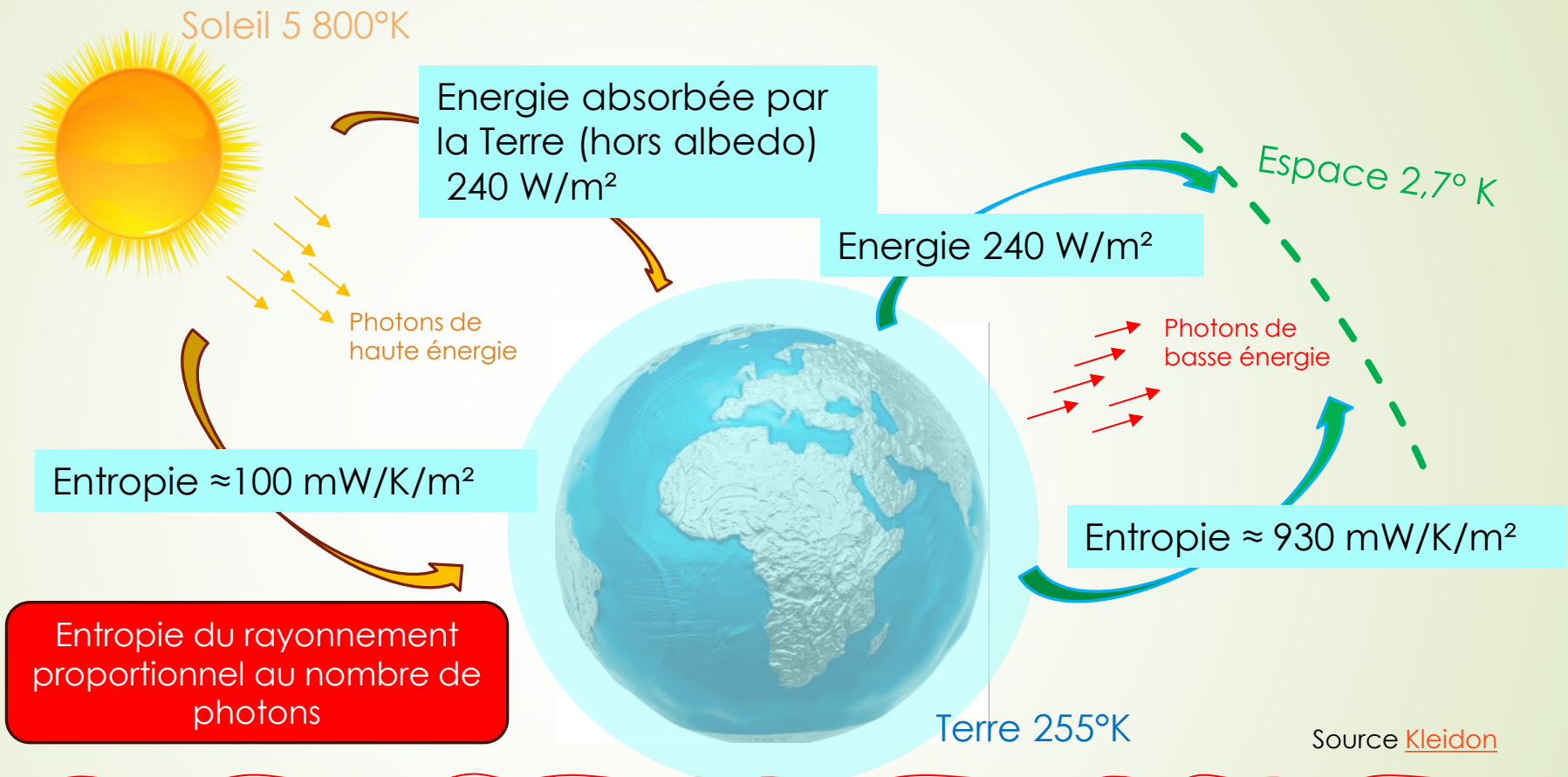
L'environnement gagne en entropie (plus que) ce que la vie organisée en perd
L'environnement paye en désordre (plus que) ce que la vie gagne en ordre

- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires
- Dans les systèmes composites, la chaleur est une propriété émergente liée à l'agitation désordonnée des composants élémentaires
- L'entropie est une autre grandeur émergente des systèmes, elle caractérise le degré de désordre de l'énergie cinétique des composants ; dans les systèmes isolés et lors des conversions d'énergie, l'entropie croît toujours.
- L'énergie libre est la part de l'énergie totale des systèmes qui n'est pas bloquée sous forme entropique (chaleur)
- Notre civilisation basée sur la combustion du carbone est très créatrice d'entropie (sans compter l'effet de serre)
- Une structure ordonnée maintient son entropie basse, si elle est traversée par un flux d'énergie, lui permettant de dissiper l'entropie qu'elle crée.

Le bilan énergétique de la Terre

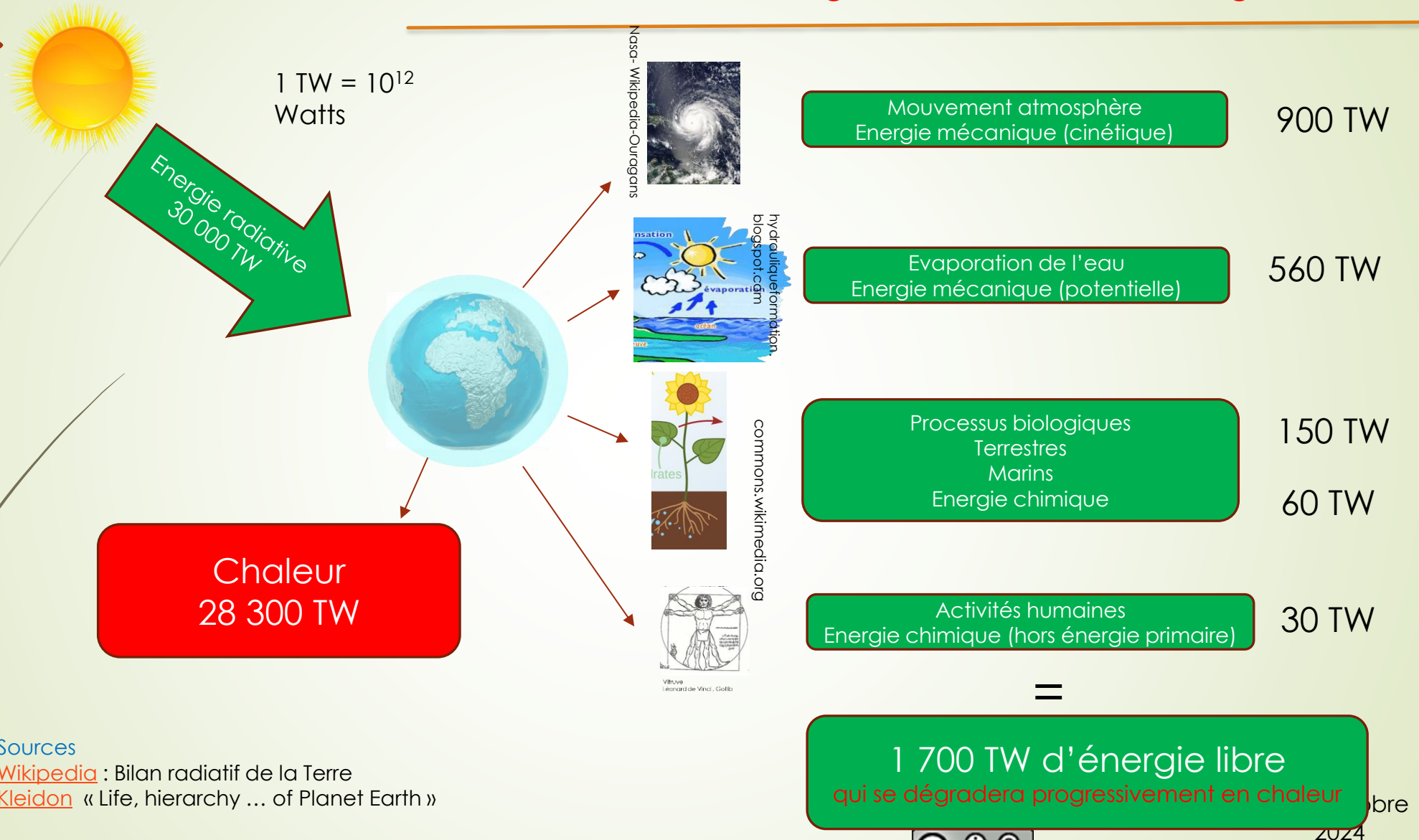
Source Wikipedia : bilan radiatif de la terre





La planète Terre est une machine à créer de l'entropie (désordre, chaleur)

Le « budget » de la Terre en énergie libre



Comparaison bilan Lune/Terre



- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires
- Dans les systèmes composites, la chaleur est une propriété émergente liée à l'agitation désordonnée des composants élémentaires
- L'entropie est une autre grandeur émergente des systèmes, elle caractérise le degré de désordre de l'énergie cinétique des composants ; dans les systèmes isolés et lors des conversions d'énergie, l'entropie croît toujours (2^{ème} principe).
- L'énergie libre est la part de l'énergie totale des systèmes qui n'est pas bloquée sous forme entropique (chaleur)
- Notre civilisation basée sur la combustion du carbone est très créatrice d'entropie (sans compter l'effet de serre)
- Une structure ordonnée maintient son entropie basse, si elle est traversée par un flux d'énergie, lui permettant de dissiper l'entropie qu'elle crée.
- Le flux d'énergie du Soleil permet à la Terre de générer de l'énergie libre, source des énergies en stock et en flux que nous utilisons.

Diagramme illustrant l'histoire de l'univers, montrant l'expansion et les événements clés :

- Rayon de l'univers observable** (axe vertical)
- Âge de l'univers** (axe horizontal)
- Événements clés :**
 - Big Bang** (à l'origine)
 - Inflation** (entre 10^{-36} s et 10^{-32} s)
 - Fluctuations quantiques** (à l'origine)
 - Preuves témoins** (entre 10^{-32} s et 10^{-12} s)
 - Début de la fusion nucléaire** (à 10^{-12} s)
 - Fin de la fusion nucléaire** (à 3 min)
 - Ère d'effluents cosmologiques** (entre $380\,000$ ans et $13,8$ milliards d'années)
 - Formation de l'hydrogène neutre** (à $380\,000$ ans)
 - Ère moderne** (à partir de $13,8$ milliards d'années)
- Les photons nous diffusent la lumière** (à $380\,000$ ans)
- Première époque visible** (à $380\,000$ ans)
- 13,8 milliards d'années** (à l'extrémité)

Ère stellifère (10^{12} ans) → Ère dégénérée (10^{1000} ans ?) → Ère des trous noirs → Ère noire

- Formation d'étoiles nouvelles
- Univers visible se réduit aux galaxies proches

- Diminution progressive de la formation d'étoiles nouvelle
- Univers visible se réduit aux galaxies proches

- Les baryons (protons) se désintègrent
- Les trous noirs dominent ; puis s'évaporent (même les plus gros)

- Univers de photons très dilués et très froids

L'univers observable :

- 

- Au XIXème siècle, on a démontré que l'énergie mécanique et la chaleur sont 2 formes de l'énergie transformables l'une dans l'autre. D'autres formes ont été mises en évidence.
- 1^{er} principe : L'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps
- L'énergie est LA quantité conservée dans les évolutions des objets de l'univers à toutes les échelles.
- A notre échelle, il y a 6 formes d'énergie qui se transforment les unes dans les autres.
- A l'échelle microscopique, l'énergie provient des 4 interactions fondamentales et de l'énergie cinétique des composants élémentaires
- Dans les systèmes composites, la chaleur est une propriété émergente liée à l'agitation désordonnée des composants élémentaires
- L'entropie est une autre grandeur émergente des systèmes, elle caractérise le degré de désordre de l'énergie cinétique des composants ; dans les systèmes isolés et lors des conversions d'énergie, l'entropie croît toujours (2^{ème} principe).
- L'énergie libre est la part de l'énergie totale des systèmes qui n'est pas bloquée sous forme entropique (chaleur)
- Notre civilisation basée sur la combustion du carbone est très créatrice d'entropie (sans compter l'effet de serre)
- Une structure ordonnée maintient son entropie basse, si elle est traversée par un flux d'énergie, lui permettant de dissiper l'entropie qu'elle crée.
- Le flux d'énergie du Soleil permet à la Terre de générer de l'énergie libre, source des énergies en stock et en flux que nous utilisons.
- L'Univers est un système dont l'entropie croît au fur et à mesure où il s'étend. Le scénario le plus probable de son avenir est un gaz très(très) dilué de photons de très(très) basse énergie

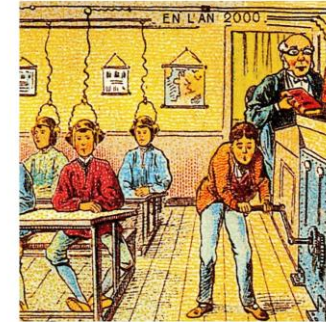
Merci



La chaîne
YouTube



Le blog



Podcasts

bernard.remaud@univ-nantes.fr

<https://www.un-peu-de-physique.fr>

<https://www.youtube.com/channel/UCdPBh5KXlOl50MEV8p1DrIA/playlists>

<https://open.spotify.com/show/42wWpSd2qk9Lx9y7dy5bYI>