

# Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

## L'énergie dans tous ses états

[Bernard Remaud](#)

[bernard.remaud@univ-nantes.fr](mailto:bernard.remaud@univ-nantes.fr)  
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



[La chaîne YouTube](#)



[Le blog](#)

L'énergie dans tous ses états

L'énergie de la Terre et de l'Univers

2026

Ère de Planck  $t < 10^{-42} s$   
**La quantité d'énergie de l'Univers est déterminée pour toujours**

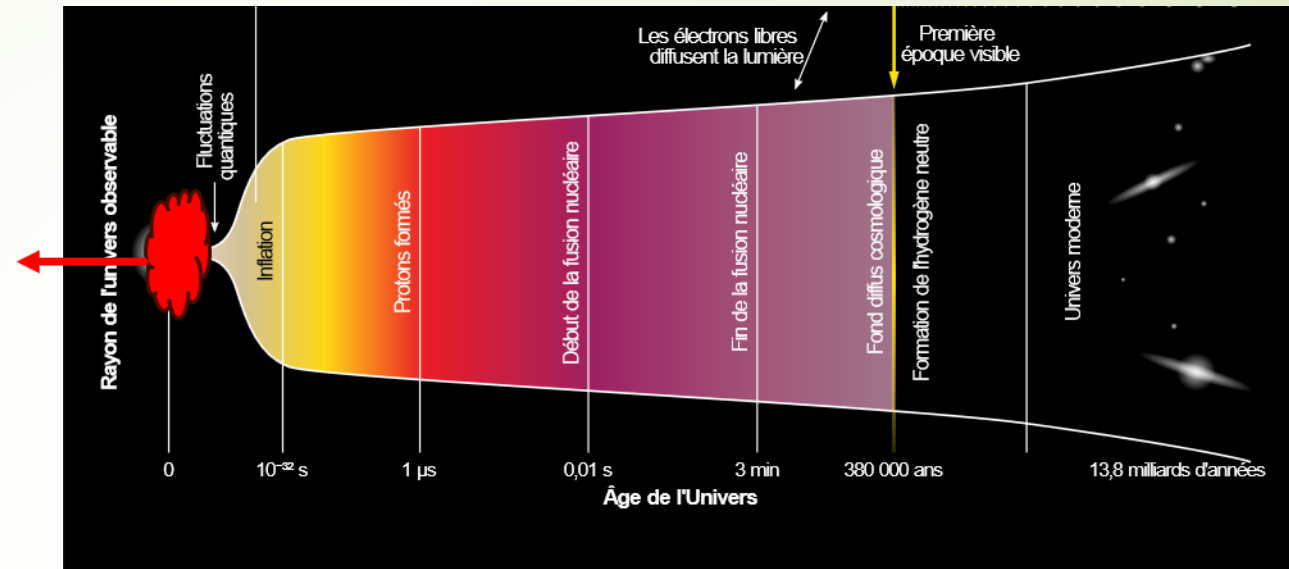
Densité d'énergie initiale

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

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

Densité estimée aujourd'hui

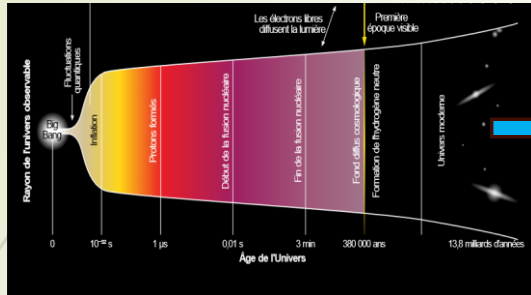
$$E_{\text{présent}} \sim 0,9 \cdot 10^{-10} J(\text{oule})/m^3$$



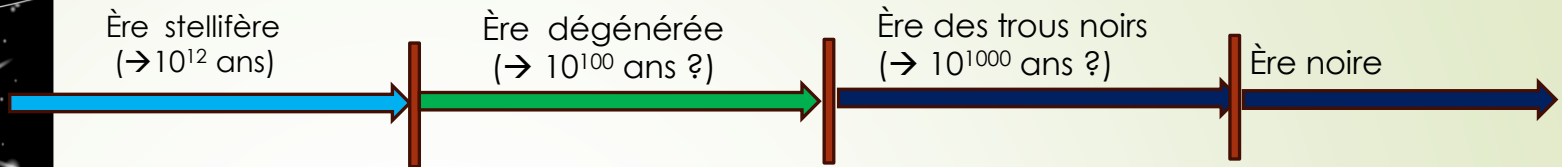
Histoire de l'Univers - Par National Science Foundation

Quel est le futur énergétique de l'Univers ?

Hypothèse : expansion continue



Histoire de l'Univers - Par National Science Foundation



**Ère stellifère ( $10^{12}$  ans)**

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

**Ère dégénérée ( $10^{100}$  ans ?)**

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

**Ère des trous noirs**

- Les baryons (protons) se sont désintégrés
- Les trous noirs dominant ; puis s'évaporent (même les plus gros)

**Ère noire**

- Univers de photons très dilués et très froids

Question ouverte : Univers ouvert ou isolé ?

L'univers observable :

- Âge env. 13,8 Milliards d'années
- Rayon env. 46,5 milliards d'années-lumière (actuellement)
- Se vide. Actuellement : les objets les plus lointains « s'éloignent » avec une vitesse de  $3,4c$  (vitesse de la lumière)

- Les modèles actuels prédisent une croissance de l'entropie de l'univers vers un état très froid, très dilué où la matière aura disparu.

L'entropie de l'Univers était initialement très basse (valeur ?)

Ses principales composantes sont :

- Les trous noirs super massifs (SMBH)
- Les trous noirs stellaires
- Les photons et neutrinos
- La matière noire (CDM)
- Les gravitons (?)
- La matière interstellaire (ISM) ou intergalactique (IGM)
- La matière des étoiles

Mise à part l'entropie des trous noirs et de la matière stellaire l'entropie est relativement stable depuis les premiers instants de l'univers.

CURRENT ENTROPY OF THE OBSERVABLE UNIVERSE (SCHEME 1)

Component	Entropy Density $s [k m^{-3}]$	Entropy $S [k]$
SMBHs	$8.4^{+8.2}_{-4.7} \times 10^{23}$	$3.1^{+3.0}_{-1.7} \times 10^{104}$
Stellar BHs ( $2.5 - 15 M_{\odot}$ )	$1.6 \times 10^{17+0.6}_{-1.2}$	$5.9 \times 10^{97+0.6}_{-1.2}$
Photons	$1.478 \pm 0.003 \times 10^9$	$5.40 \pm 0.15 \times 10^{89}$
Relic Neutrinos	$1.411 \pm 0.014 \times 10^9$	$5.16 \pm 0.15 \times 10^{89}$
WIMP Dark Matter	$5 \times 10^{7 \pm 1}$	$2 \times 10^{88 \pm 1}$
Relic Gravitons	$1.7 \times 10^{7+0.2}_{-2.5}$	$6.2 \times 10^{87+0.2}_{-2.5}$
ISM and IGM	$20 \pm 15$	$7.1 \pm 5.6 \times 10^{81}$
Stars	$0.26 \pm 0.12$	$9.5 \pm 4.5 \times 10^{80}$
<b>Total</b>	<b><math>8.4^{+8.2}_{-4.7} \times 10^{23}</math></b>	<b><math>3.1^{+3.0}_{-1.7} \times 10^{104}</math></b>

C.A. Egan et al.

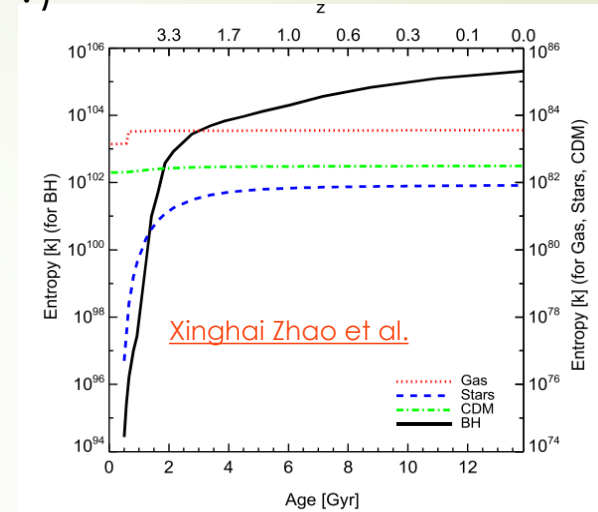


Figure 3. The evolution history of the entropy of the gas, stars, DM and BHs in the Universe. Note the different scales on the left and right axes. The left y-axis corresponds to the BH entropy, while the right y-axis corresponds to the gas, star and DM entropy.

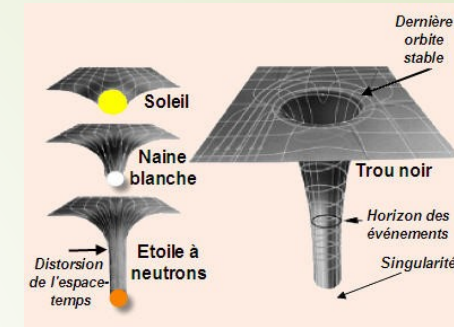
L'entropie des trous noirs domine (aujourd'hui) largement l'entropie de l'univers et est toujours croissante

L'énergie courbe localement la structure de l'espace-temps (relativité générale)

Si la densité d'énergie devient très, très grande, ou si la masse devient très grande : la **courbure** de l'espace peut devenir **infinie**.

La limite en deçà de laquelle rien (lumière ou matière) ne peut s'échapper est **le rayon de Schwarzschild** ( $m$  masse du trou noir)

$$r_s = \frac{2Gm}{c^2}$$

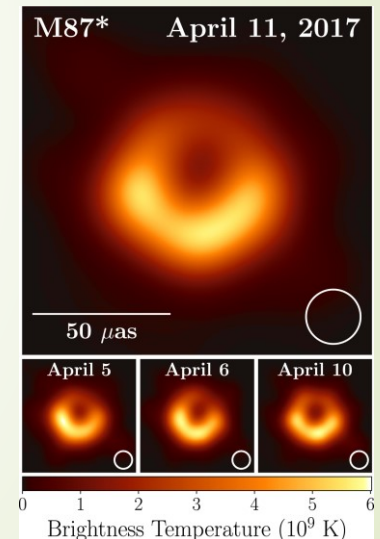


<http://www.linternaute.com/>

Type de trou noir	Masse (soleil)	Rayon de Schwarzschild	Masse volumique
Terre	$3 \cdot 10^{-6}$	0,9 cm	$1,5 \cdot 10^{30} \text{ kg/m}^3$
Soleil	1	3 km	$1,7 \cdot 10^{19} \text{ kg/m}^3$
Trou noir stellaire	$10^2$	300 km	$1,7 \cdot 10^{15} \text{ kg/m}^3$
Trou noir massif	$10^9$	$3 \cdot 10^9 \text{ km}$	$17 \text{ kg/m}^3$

Comment évolue l'entropie des trous noirs ?

2017 – première « **observation** » d'un trou noir »  
 Transposition dans le visible des signaux « **radio** » obtenus, par interférométrie de plusieurs observatoires répartis sur la Terre.  
 Les fausses couleurs donnent des **échelles de la température** du disque d'accrétion



The Event Horizon Telescope Collaboration — (2019). Wikipedia

## Les trous noirs et l'entropie ?

Les trous noirs violent-ils le principe de croissance globale de l'entropie de l'Univers

### L'entropie d'un trou noir (Bekenstein-Hawking)

$$S = \frac{\pi}{2} k_B \frac{c^3}{hG} A$$

Une des plus belles formules de la physique

L'entropie est proportionnelle à l'aire de la sphère de rayon  $r_s = \frac{2Gm}{c^2}$  (Schwarzschild) donc proportionnelle au carré de la masse

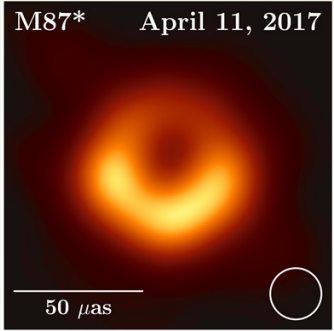
Dans un processus d'absorption de matière ou de fusion de 2 trous noirs : l'entropie croît.

### Dans un trou noir isolé, l'entropie est-elle constante ?

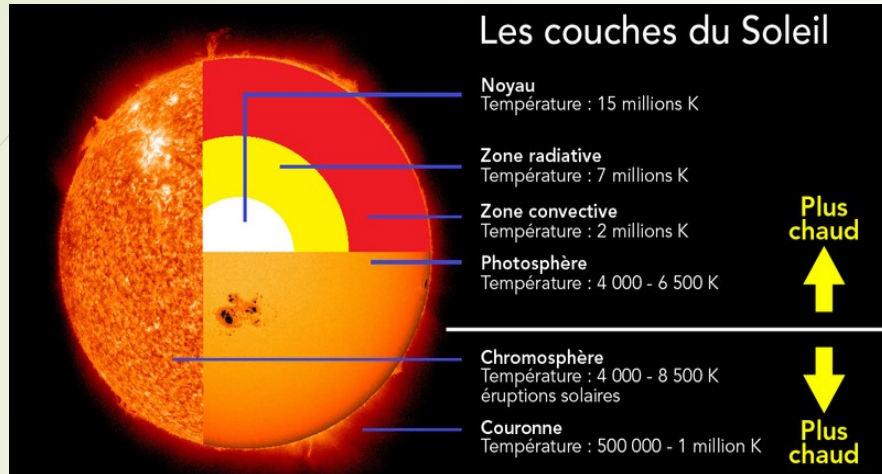
$$T = \frac{hc^3}{16\pi^2 k_B G M} \quad (\text{Température de Hawking})$$

C'est très froid : un trou noir de masse solaire  $T \rightarrow 0,12 \mu\text{K}$  ( $0,12 \cdot 10^{-6} \text{K}$ )

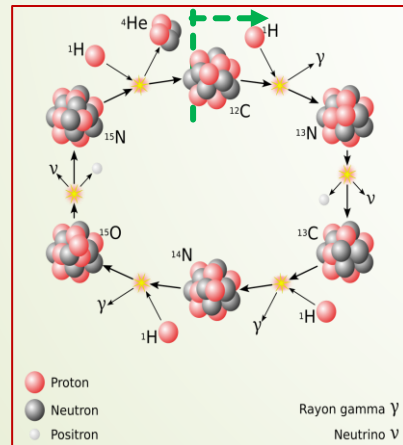
Donc un trou noir rayonne, et s'évapore en libérant son entropie (Wikipédia)



- Les modèles actuels prédisent une croissance de l'entropie de l'univers vers un état très froid, très dilué où la matière aura disparu.
- Actuellement la majorité de l'entropie de l'Univers observable est dans les trous noirs (stellaires ou supermassifs), qui s'évaporeront (rayonnement d'Hawking) sur le très long terme

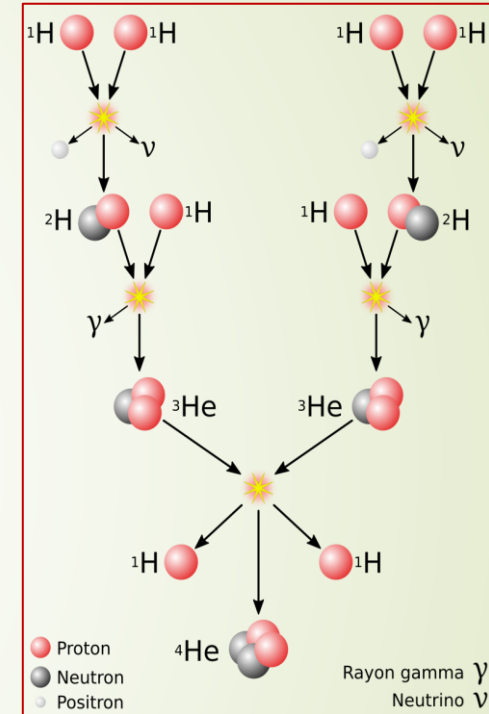


73,5 % Hydrogène, 25 % Hélium, 1,5 % autres (masse)

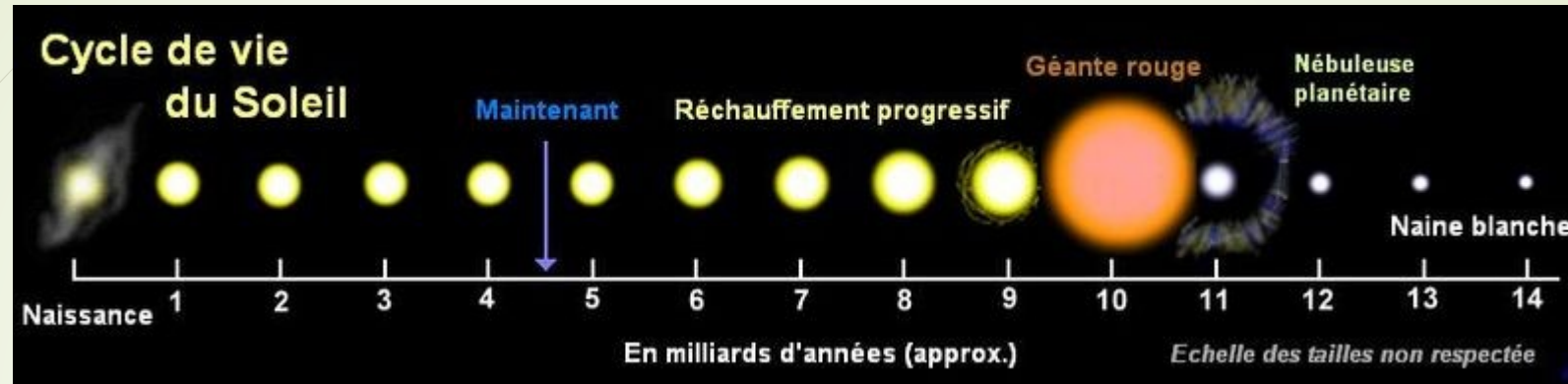


Cycle CNO (Bethe)

- Soleil** - Étoile (très) moyenne -  
Naine Jaune au milieu (4 milliards d'année) de sa vie
- Rayon : 696 342 km
  - Masse :  $1,995 \cdot 10^{30}$  kg
  - Température surface : 5 800 K
  - Température centre : 15 000 000 K
  - Flux énergie total :  $3,8 \cdot 10^{26}$  W
  - Flux énergie en surface : 64 MW/m<sup>2</sup>
  - Perte de masse :  $4 \cdot 10^9$  kg/s



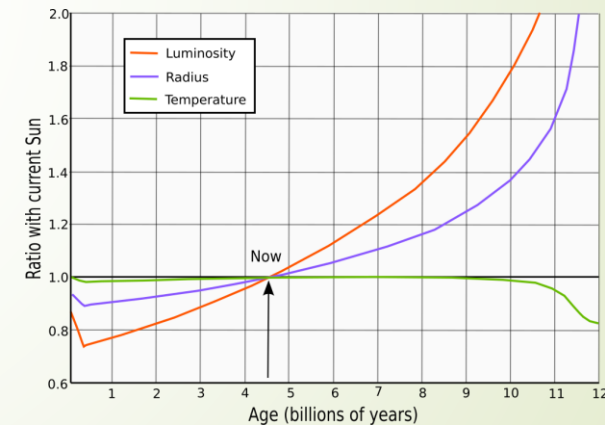
Cycle principal p-p



Source [Wikipédia](#)

À partir d'aujourd'hui, **expansion et augmentation de la température**, à la suite de l'épuisement de la fusion de l'hydrogène et à la transition vers la fusion des noyaux plus lourds.

Dans 5,5 milliards d'années, il englobera les planètes les plus proches - dont la Terre ; avant d'exploser et donner naissance à une **naine blanche (1 tonne/cm<sup>3</sup>)**.



Wikipédia : Soleil



K → température en Kelvin = température en ° Celsius + 273,15

340 W/m<sup>2</sup>

100 W/m<sup>2</sup> rayonnement réfléchi (albedo)  
 220 W/m<sup>2</sup> chaleur puis réémission  
 20 W/m<sup>2</sup> énergie mécanique puis réémission  
 énergie chimique en partie réémise, en partie stockée

*La Terre est une machine qui capte une part de l'énergie du Soleil et la rend utilisable (énergie libre) par des systèmes évolués notamment biologiques*

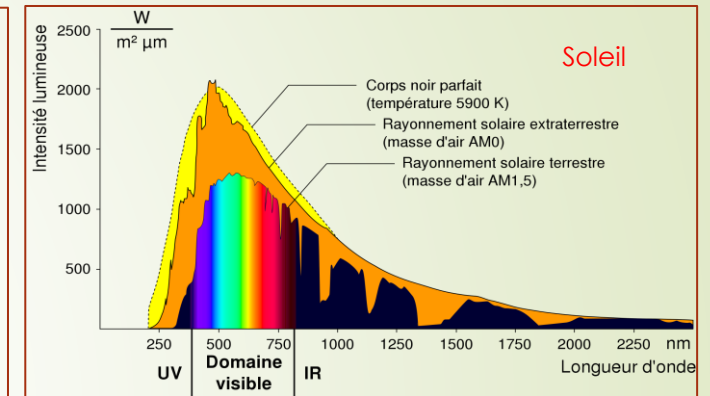
**Note :** le flux solaire sur une surface plane perpendiculaire au Soleil est 1 360 W/m<sup>2</sup> ; la section plane de la Terre est  $\pi R^2$ , si l'on prend la moyenne sur sa surface  $4\pi R^2$ , le flux moyen est 4 fois plus faible.

En première approximation, le Soleil et la Terre sont des « corps noirs » avec un spectre de rayonnement électro-magnétique donné par la loi de Planck.

Flux différentiel  $d\Phi$  - en longueur d'onde  $\lambda$  - de l'énergie ( $J/m^2$ ) émise en fonction de la température  $T$

$$d\Phi = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T} - 1\right)} d\lambda$$

- Flux total émis  $\Phi(Wm^{-2}) = \sigma T^4$ , (loi de Stefan)  
avec  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$
- Longueur d'onde pour flux maximum :  $\lambda_M T \cong 3 \cdot 10^{-3} (m.K)$   
ou  $\nu_M = 10^{11} T (Hz)$



Source Wikipédia

**Le Soleil :  $T \cong 6\,000\,K$**

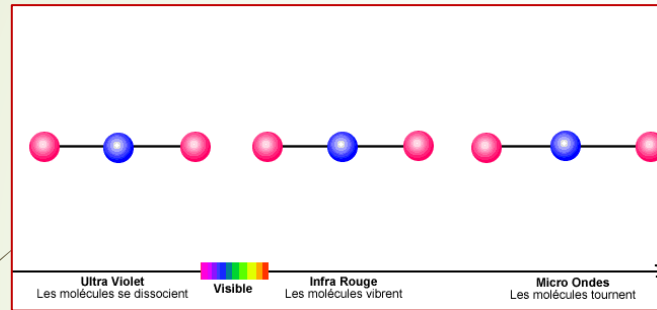
- Maximum de rayonnement :  $\lambda_M = 500 \mu m$  ou  $\nu_M = 0,6 \cdot 10^{15} Hz$   
*(spectre de la lumière visible)*
- Flux total  $73\,000\,000\, W/m^2$

**La Terre, hypothèse :  $T \cong 300\,K$**

- Maximum de rayonnement :  $\lambda_M = 10\,000 \mu m$  ou  $\nu_M = 0,03 \cdot 10^{15} Hz$   
*(infrarouge)*
- Flux Total  $460\, W/m^2$
- En réalité : flux total  $340\, W/m^2 \rightarrow T_{\text{corps noir}} \approx 278\, K$

Noter que l'énergie d'un photon est  $h\nu$ , proportionnelle à la fréquence.  
Il faut (environ) 20 fois plus de photons à la Terre pour évacuer une quantité donnée d'énergie reçue du Soleil

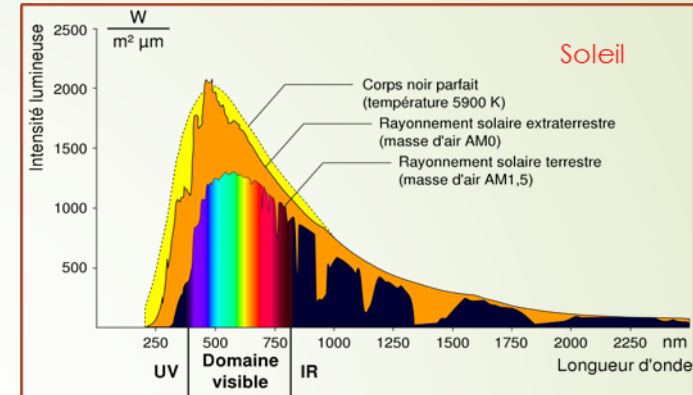
L'atmosphère terrestre filtre le rayonnement solaire  
(transparent pour la lumière visible, bloque l'infrarouge)



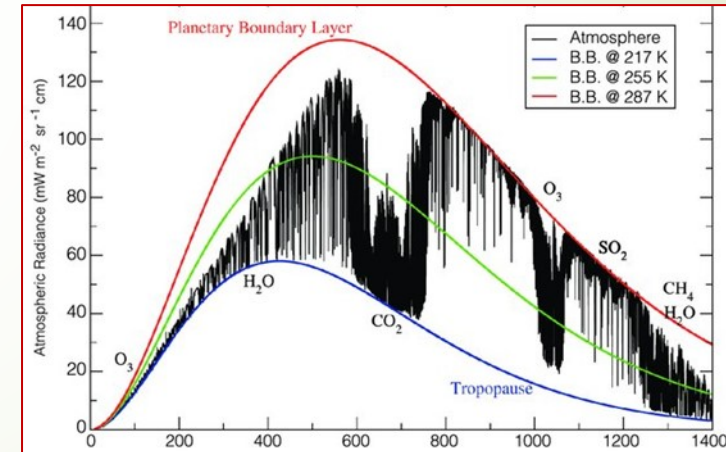
Le rayonnement électromagnétique (certaines fréquences) excite les modes de rotation ou vibration des molécules complexes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , etc.) et est diffusé sous forme de chaleur. → *effet de serre*

Le rayonnement émis par la Terre diffère de celui d'un corps noir à 300 K  
(absorption dans l'infrarouge surtout par les molécules complexes)

## Le rôle de l'atmosphère terrestre



Source [Wikipédia](#)



Source [Bianchini et al.](#)

- Les modèles actuels prédisent une croissance de l'entropie de l'univers vers un état très froid, très dilué où la matière aura disparu.
- Actuellement la majorité de l'entropie de l'Univers observable est dans les trous noirs (stellaires ou supermassifs), qui s'évaporeront (rayonnement d'Hawking) sur le très long terme
- L'énergie reçue du Soleil ( $340\text{W/m}^2$ ) est rediffusée directement (30% albedo), mais surtout réémise sous forme d'infra-rouge (70%). Le modèle du « corps noir » s'applique bien pour le Soleil ; pour la Terre, il faut tenir compte de son atmosphère.



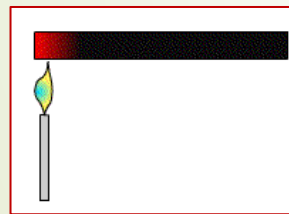
Serre de plastique



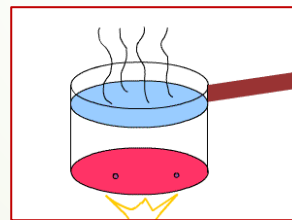
Serre en verre

Même effet ?

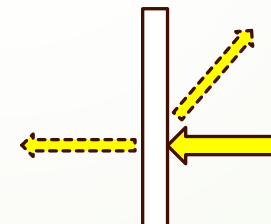
Conduire la chaleur



Diffusion

Source :  
planet-terre.ens-lyon.fr

convection



Transmission

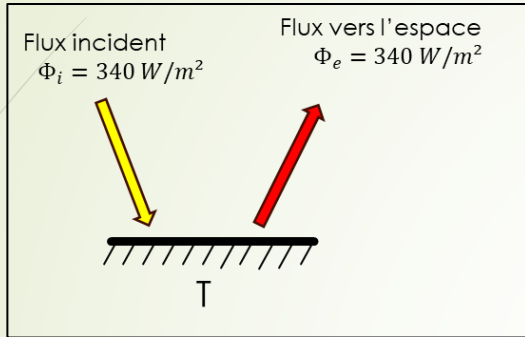
Transmission

Matériau	Rayon visible	Infrarouge
Bois	Opaque	Opaque
Verre	Transparent	Opaque
Plastique transparent	Transparent	Transparent
Plastique noir	Opaque	Transparent

1896 Arrhénius : effet du  $\text{CO}_2$  sur température terrestre

Ambiguïté « effet de serre »  
GIEC XXI<sup>ème</sup> siècle : **forçage radiatif**

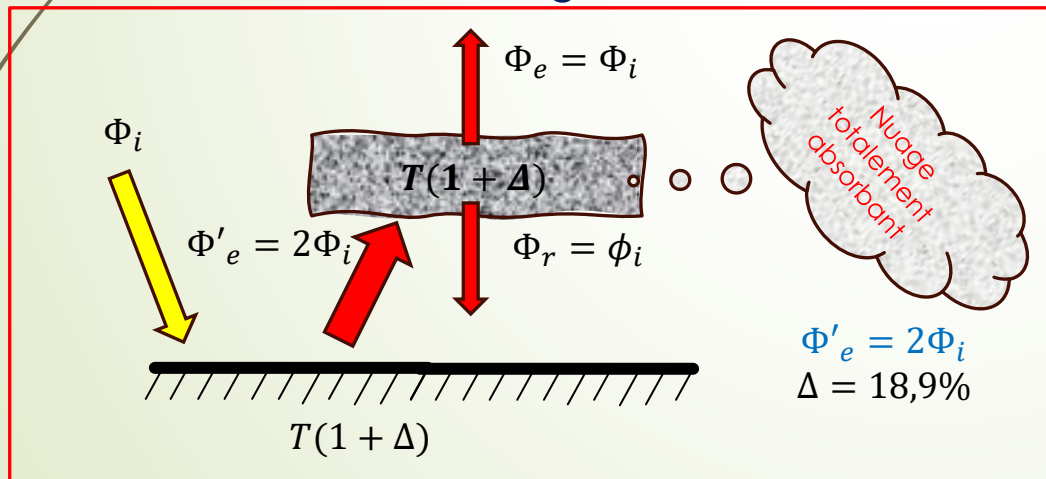
## Émission corps noir



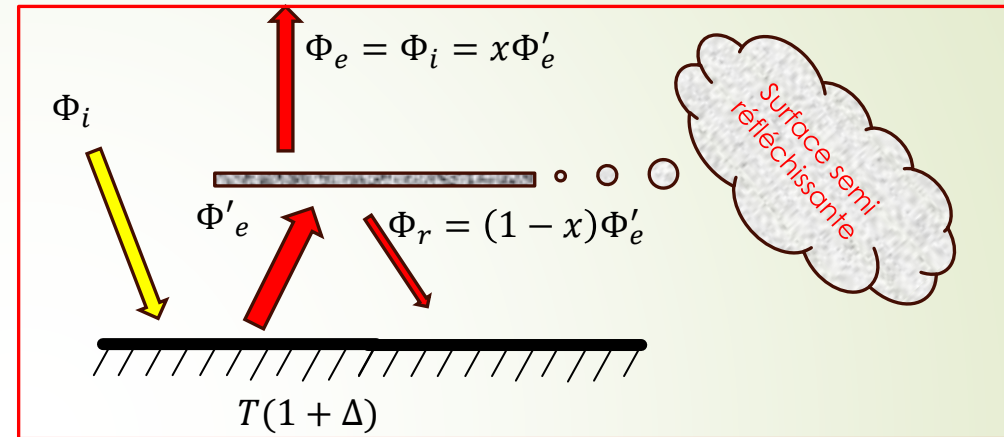
$$\Phi_e = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \Rightarrow T = 278 \text{ K (5°C)}$$

## Émission avec « nuage » absorbant



## Émission avec « nuage » réfléchissant



$$\Phi'_e = \sigma T(1 + \Delta)^4 = \frac{\Phi_i}{x} \rightarrow \Delta \sim \frac{1}{4} \left( \frac{1-x}{x} \right)$$

Pour  $T = 300 \text{ K}$

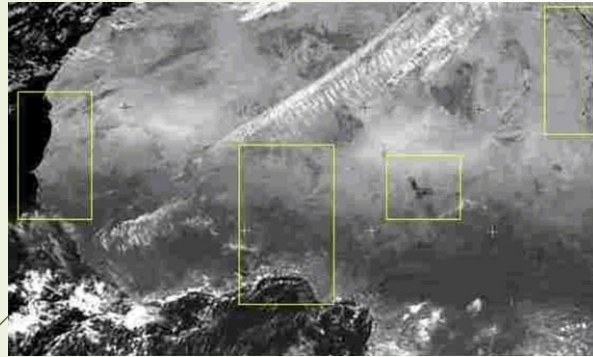
Si  $x = 95\% \rightarrow \Delta \sim 1,3\% \rightarrow \Delta T = 4 \text{ K}$

Si  $x = 80\% \rightarrow \Delta \sim 5,8\% \rightarrow \Delta T = 17,4 \text{ K}$

Si  $x = 70\% \rightarrow \Delta \sim 10,7\% \rightarrow \Delta T = 32,1 \text{ K}$

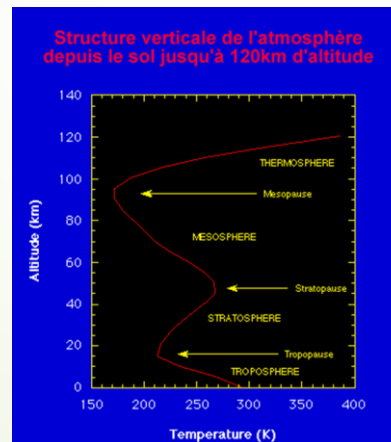
Modèles très simplifiés

L'**albedo** (la partie de l'énergie réfléchi) vers l'espace dépend fortement des conditions locales (sol ← → mer, nuages, glace végétation,...)



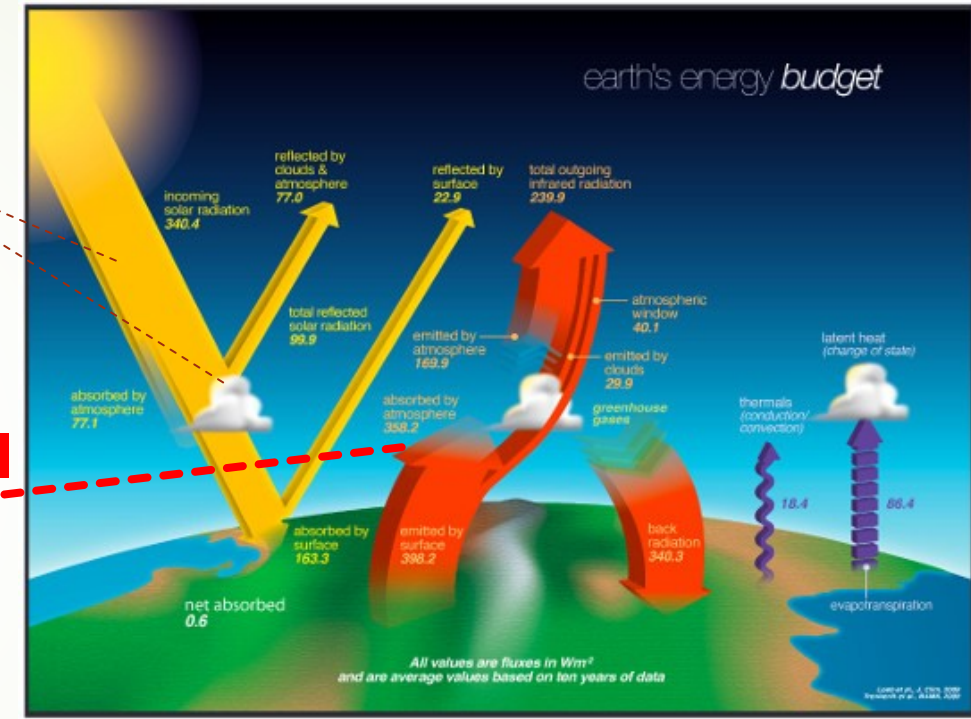
Spectre visible réfléchi vu de l'espace

L'effet de serre explique que la température **calculée** pour la Terre est inférieure de 33 K à la température **observée** ( $T_{OBS} = 287$  K).



albedo

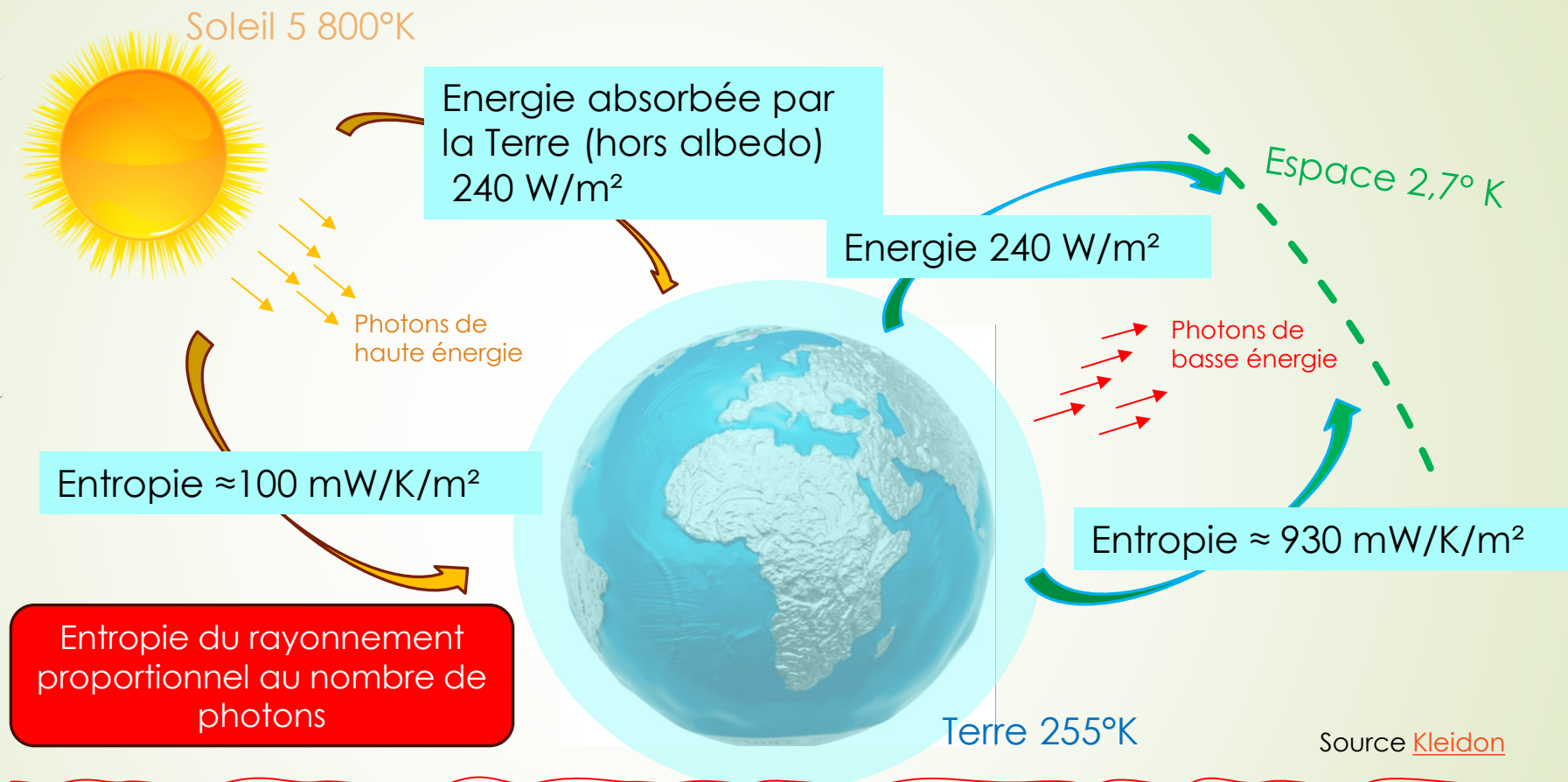
Effet de serre



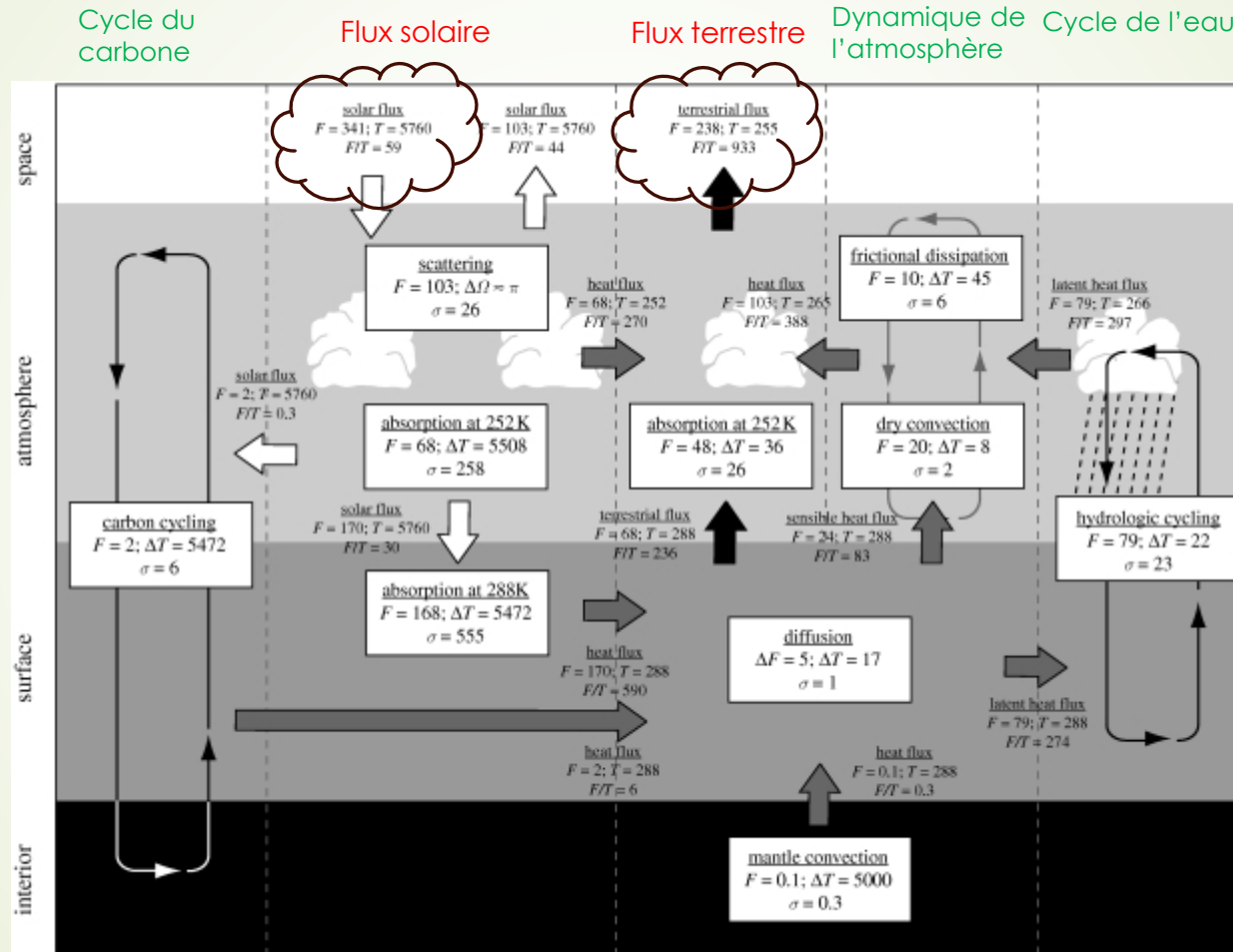
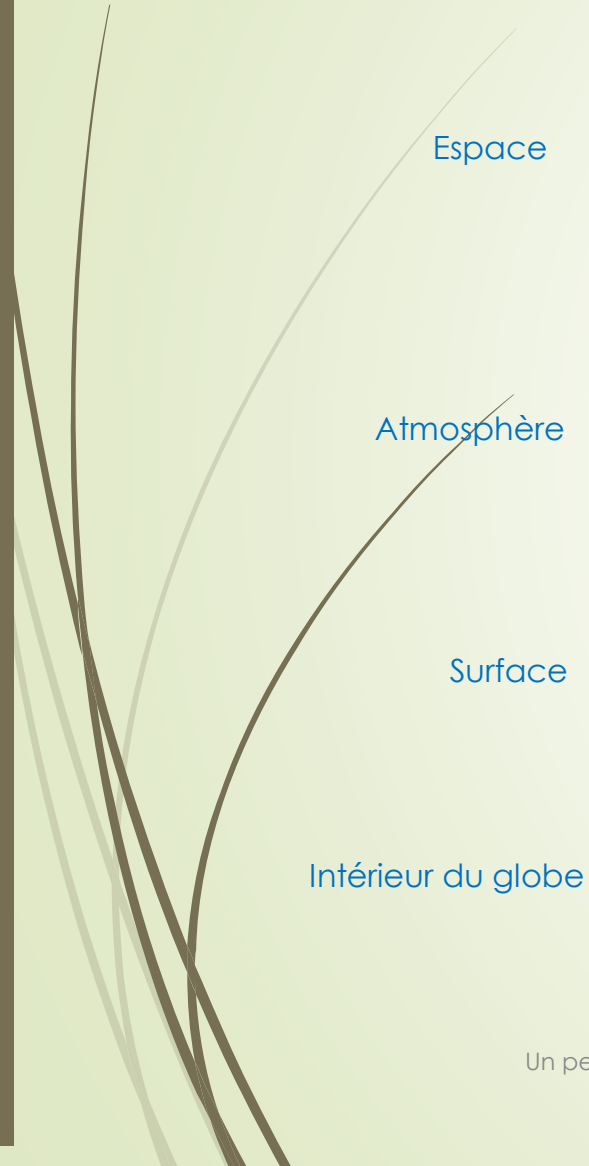
Source [NASA](#)

Les différentes couches de l'atmosphère contribuent de manière différenciée à l'effet de serre  
La température (équivalent corps noir) de la Terre est estimée à 255 K ([Kleidon](#))

- Les modèles actuels prédisent une croissance de l'entropie de l'univers vers un état très froid, très dilué où la matière aura disparu.
- Actuellement la majorité de l'entropie de l'Univers observable est dans les trous noirs (stellaires ou supermassifs), qui s'évaporeront sur le très long terme
- L'énergie reçue du Soleil ( $340\text{W/m}^2$ ) est rediffusée directement (30% albedo), mais surtout réémise sous forme d'infra-rouge (70%). Le modèle du « corps noir » s'applique bien pour le Soleil ; pour la Terre, il faut tenir compte de son atmosphère.
- L'effet de serre induit par certaines molécules de l'atmosphère se traduit par une augmentation de la température observée de la Terre par rapport à celle du « corps noir » équivalent.



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

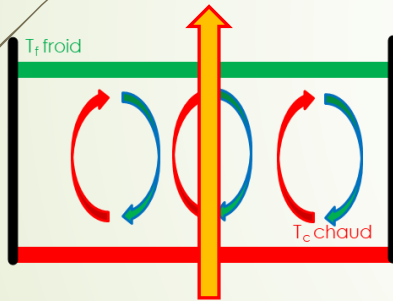
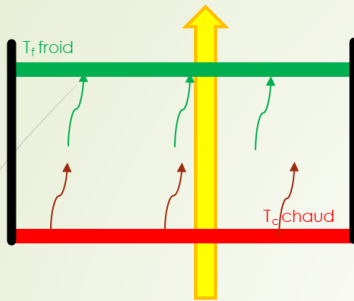


- ⇨ Radiation solaire
- ⇨ Radiation terrestre
- ⇨ Échange de chaleur
- ⇨ Échange de matière

Source [Kleidon](#)

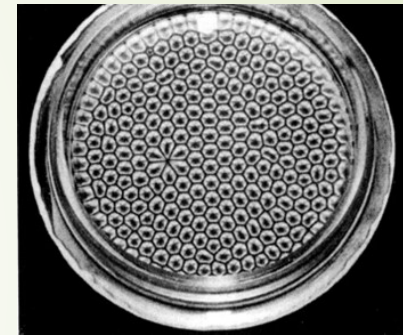
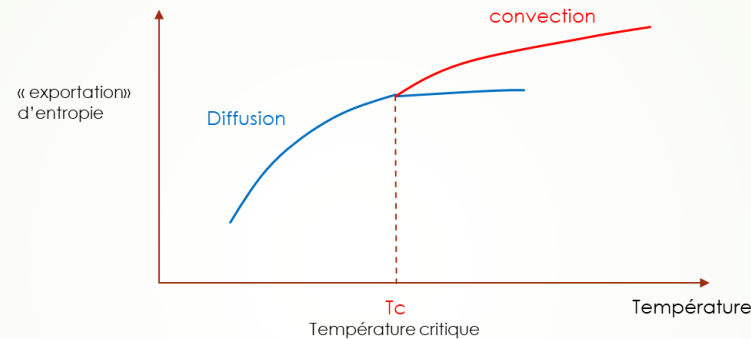
## Comparaison bilan Lune/Terre





### Proche de l'équilibre

- Équilibre statique
- Pas de direction privilégiée dans le plan (Isotropie XOY)
- *Croissance de l'entropie interne* (agitation des molécules)

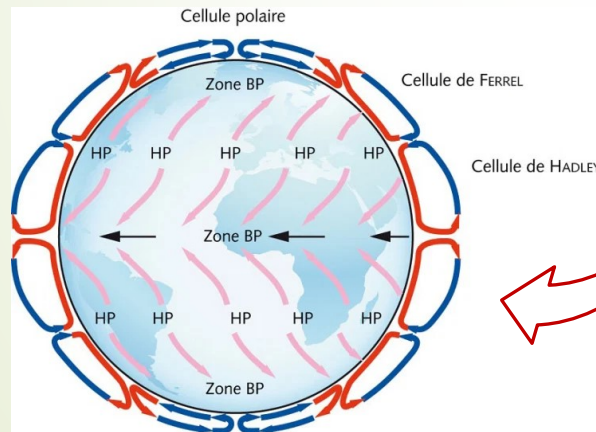
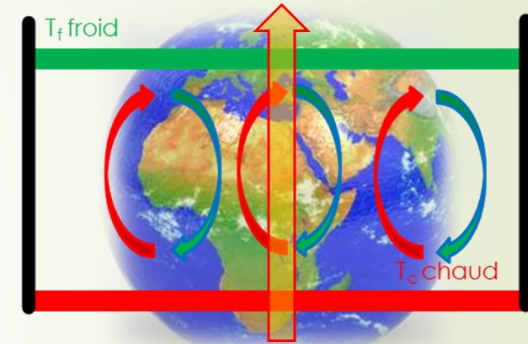
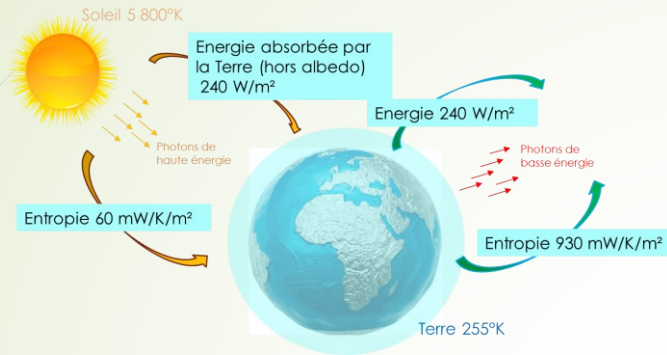


### Loin de l'équilibre – structures dissipatives

- Équilibre dynamique (stabilité de formes)
- Brisure de symétrie (anisotropie XOY)
- *Décroissance de l'entropie interne* (auto-organisation des courants dans le liquide)
- Apparition d'*énergie libre* (énergie cinétique du liquide)

**Le moteur** : Maximiser la production (exportation) d'entropie

# La Terre comme - structure dissipative



La Terre comme structure dissipative

- Les modèles actuels prédisent une croissance de l'entropie de l'univers vers un état très froid, très dilué où la matière aura disparu.
- Actuellement la majorité de l'entropie de l'Univers observable est dans les trous noirs (stellaires ou supermassifs), qui s'évaporeront sur le très long terme
- L'énergie reçue du Soleil ( $340\text{W/m}^2$ ) est rediffusée directement (30% albedo), mais surtout réémise sous forme d'infra-rouge (70%). Le modèle du « corps noir » s'applique bien pour le Soleil ; pour la Terre, il faut tenir compte de son atmosphère.
- L'effet de serre induit par certaines molécules de l'atmosphère se traduit par une augmentation de la température observée de la Terre par rapport à celle du corps noir équivalent.
- L'entropie créée par la Terre correspond à la transformation du rayonnement solaire reçu (basse entropie) en chaleur basse température et à la création d'énergie libre dans son atmosphère.

# Le « budget » de la Terre en énergie libre



Energie radiative  
30 000 TW

1 TW = 10<sup>12</sup>  
Watts



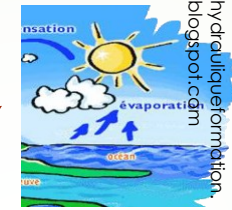
Chaleur  
28 300 TW

Nasa - Wikipedia - Ouragans



Mouvement atmosphère  
Energie mécanique (cinétique)

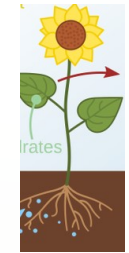
900 TW



hydrologiqueformation.blogspot.com

Evaporation de l'eau  
Energie mécanique (potentielle)

560 TW

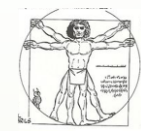


commons.wikimedia.org

Processus biologiques  
Terrestres  
Marins  
Energie chimique

150 TW

60 TW



Vue de Vinci, Gollib

Activités humaines  
Energie chimique (hors énergie primaire)

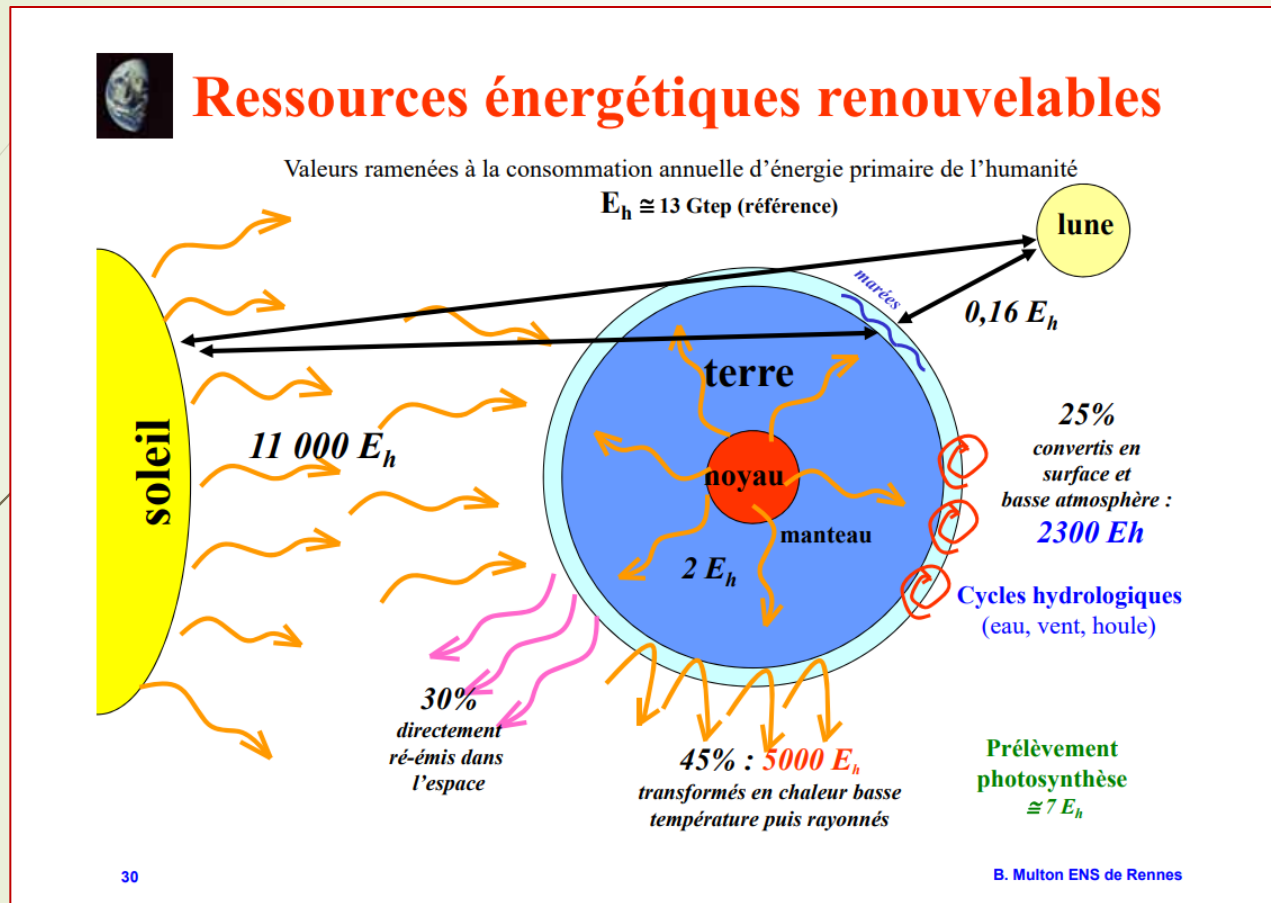
30 TW

=

1 700 TW d'énergie libre  
qui se dégradera progressivement en chaleur

Sources

Wikipedia : Bilan radiatif de la Terre  
Kleidon « Life, hierarchy ... of Planet Earth »



Une autre vision

- Les modèles actuels prédisent une croissance de l'entropie de l'univers vers un état très froid, très dilué où la matière aura disparu.
- Actuellement la majorité de l'entropie de l'Univers observable est dans les trous noirs (stellaires ou supermassifs), qui s'évaporeront sur le très long terme
- L'énergie reçue du Soleil ( $340\text{W/m}^2$ ) est rediffusée directement (30% albedo), mais surtout réémise sous forme d'infra-rouge (70%). Le modèle du « corps noir » s'applique bien pour le Soleil ; pour la Terre, il faut tenir compte de son atmosphère.
- L'effet de serre induit par certaines molécules de l'atmosphère se traduit par une augmentation de la température observée de la Terre par rapport à celle du corps noir équivalent.
- L'entropie créée par la Terre correspond à la transformation du rayonnement solaire reçu (basse entropie) en chaleur basse température et à la création d'énergie libre dans son atmosphère.
- L'énergie libre créée correspond à moins de 10% de l'énergie reçue du Soleil ; elle est la source des phénomènes géologiques et biologiques sur notre planète ; une petite partie (qq %) est utilisée par l'humanité pour sa survie et la fabrication d'artefacts (énergies en flux « dites renouvelables » )

## 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 (CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère)



Carbone  
Tas de charbon, localisé, non dispersé



Carbone dans l'atmosphère (CO<sub>2</sub>)  
Dispersé dans des milliards de m<sup>3</sup>

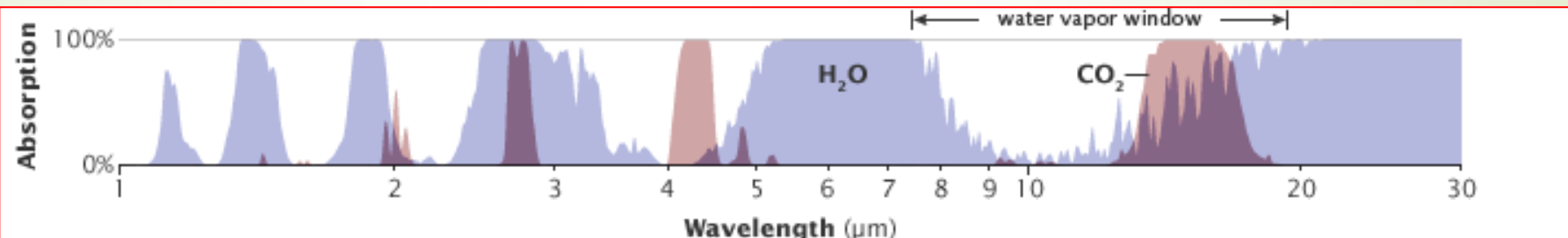
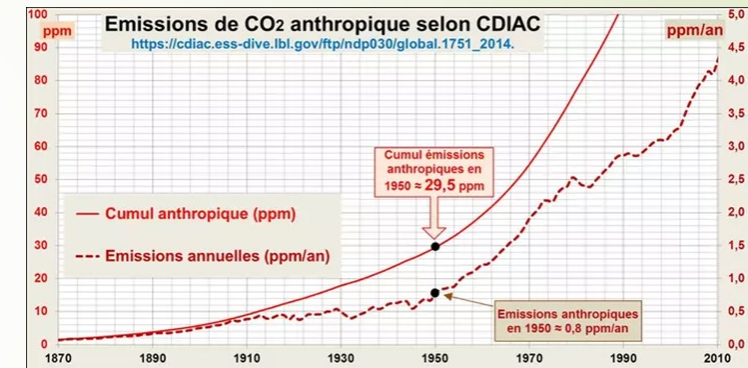
En première approximation  
Taux d'émission de CO<sub>2</sub> ≈ Taux de création d'entropie

### Les 2 effets entropiques des combustions de carbone fossile (pétrole, gaz, charbon) :

- Rendement faible (20 à 30%) nécessité de multiplier la puissance des sources
- Forte croissance de l'entropie de mélange :  
Charbon, solide confiné dans l'espace → gaz émis, dispersés dans des milliards de milliards de m<sup>3</sup> d'atmosphère (irréversibilité).

### Le 3<sup>ème</sup> effet : émission de gaz à effet de serre

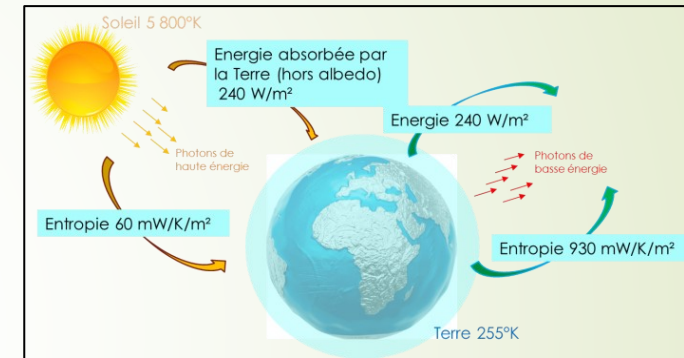
- La vapeur d'eau, mais émission humaine minime par rapport aux quantité énormes (qq %). Peu d'accumulation, elle retombe en pluie
- Le gaz carbonique CO<sub>2</sub> (0,04 %); mais s'accumule



By NASA, Robert Rohde - <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance>

Hypothèse Gaïa : La Terre est un système biogéochimique dont la dynamique est {favorable au} / {conditionnée par le} développement de la vie.

Évacuer un surplus d'énergie/entropie lié aux activités humaines ?



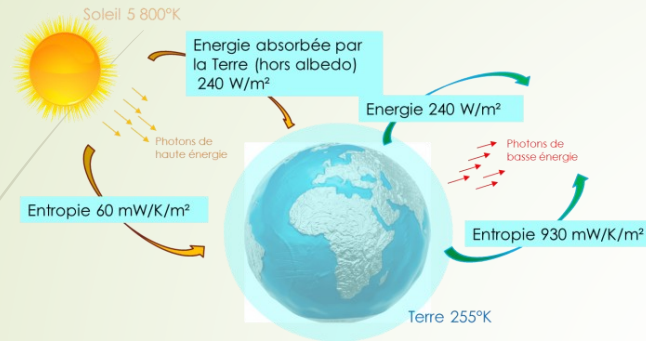
Un surplus de chaleur sur Terre (par exemple brûler du charbon) :

- La stocker sous une autre forme d'énergie (??)
- Augmenter le rayonnement de la Terre : énergie rayonnée proportionnelle à  $T^4$

Un surplus d'entropie sur Terre (échanges d'énergie entre systèmes) :

- Augmenter le rayonnement de la Terre : entropie rayonnée proportionnelle à  $T^3$
- Augmenter l'activité turbulente de l'atmosphère

Diminuer le flux solaire !!



Augmentation de  $\Delta\Phi$  (flux d'énergie dans l'atmosphère)  
 →  $\Delta T$  température

$$\text{(loi de Stefan)} \Rightarrow \frac{\Delta\Phi}{\phi} = 4 \frac{\Delta T}{T}$$

$\Delta K = 1K$  de température (sur 300 K) →  $\Delta\Phi = 3,1 W/m^2$

Or on estime à moins de 1 W/m<sup>2</sup> l'impact des activités humaines de l'ère industrielle

Seul l'usage des énergies en stock augmente le bilan de chaleur à émettre\*.

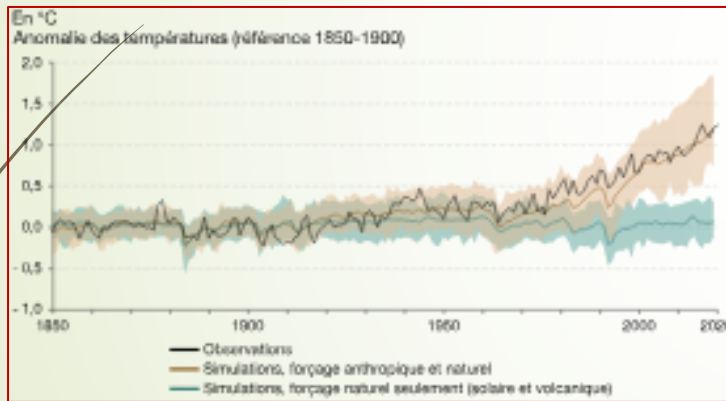
Où est le problème ?

Mais « effet de serre » : la Terre n'est pas un corps émissif parfait  
 Les équilibres des échanges énergétiques et entropiques sont modulés par la « transparence » de l'atmosphère au rayonnement infrarouge.

\* l'énergie du vent, des chutes d'eau, du rayonnement solaire, de l'uranium radioactif... aurait de toute façon été transformée en chaleur. La production d'électricité ne fait que contribuer au processus.

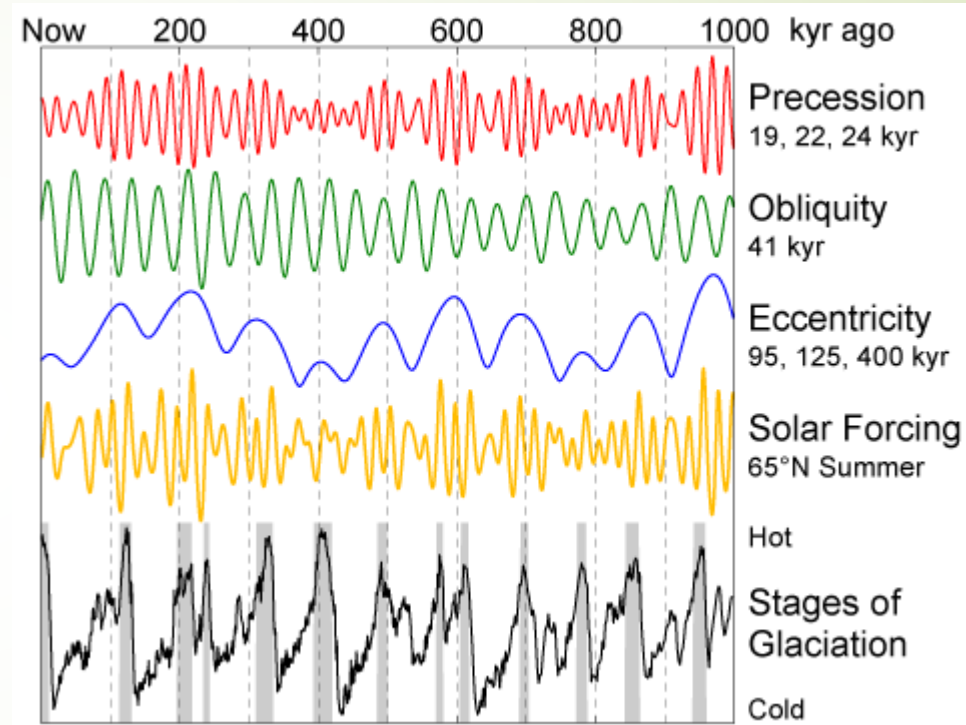
## Forçage radiatif et climat

De nombreux paramètres astronomiques influent sur l'interaction du Soleil et de la Terre, induisant des cycles dans le climat



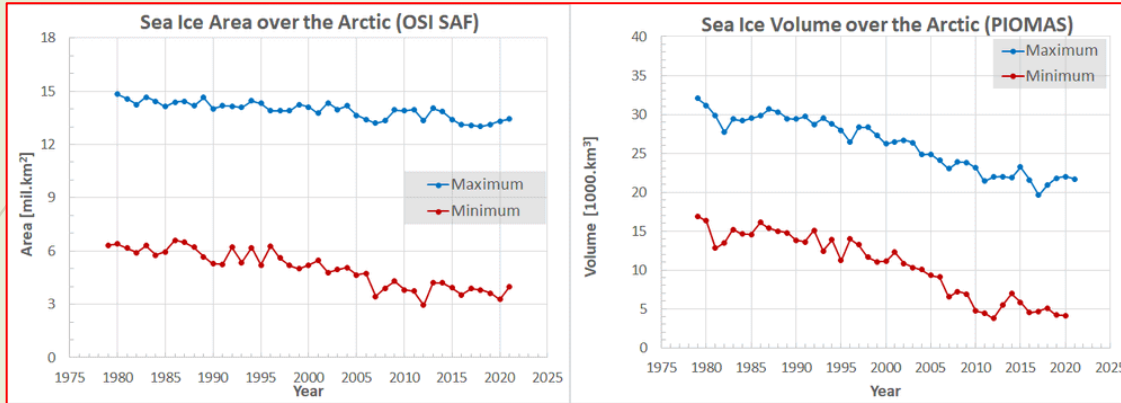
GIEC 2021

Mais selon des constantes de temps beaucoup plus longues que l'évolution observée depuis l'ère industrielle

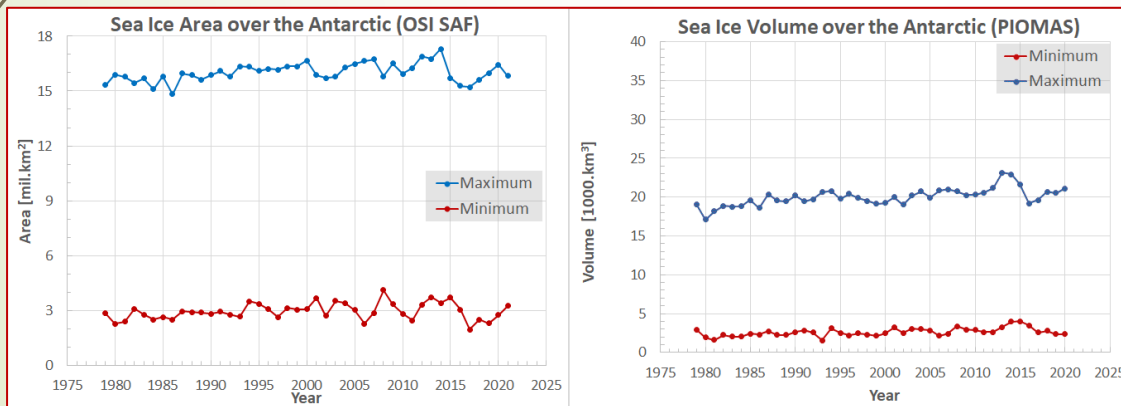


Variabilité du Climat

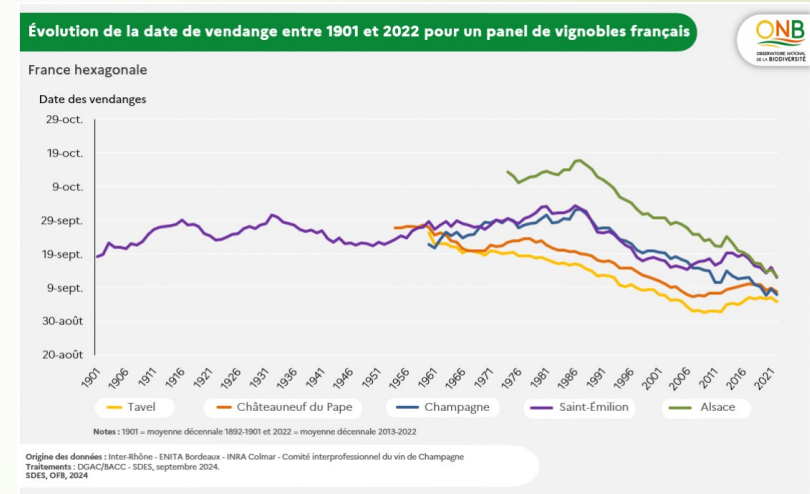
« Dérèglement » du climat ?  
Impact anthropique sur le climat



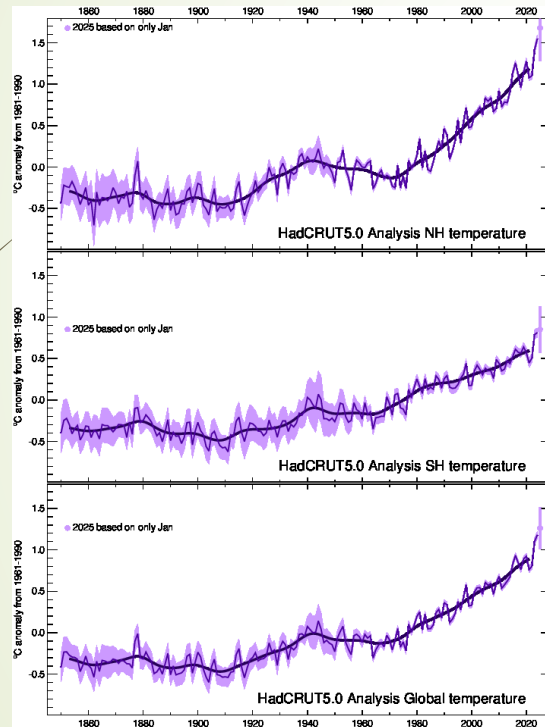
Signature : fonte des glaces polaires Données [EuMetStat](#)



Signature : date des vendanges



## Variabilité Hémisphère Nord $\leftrightarrow$ Sud



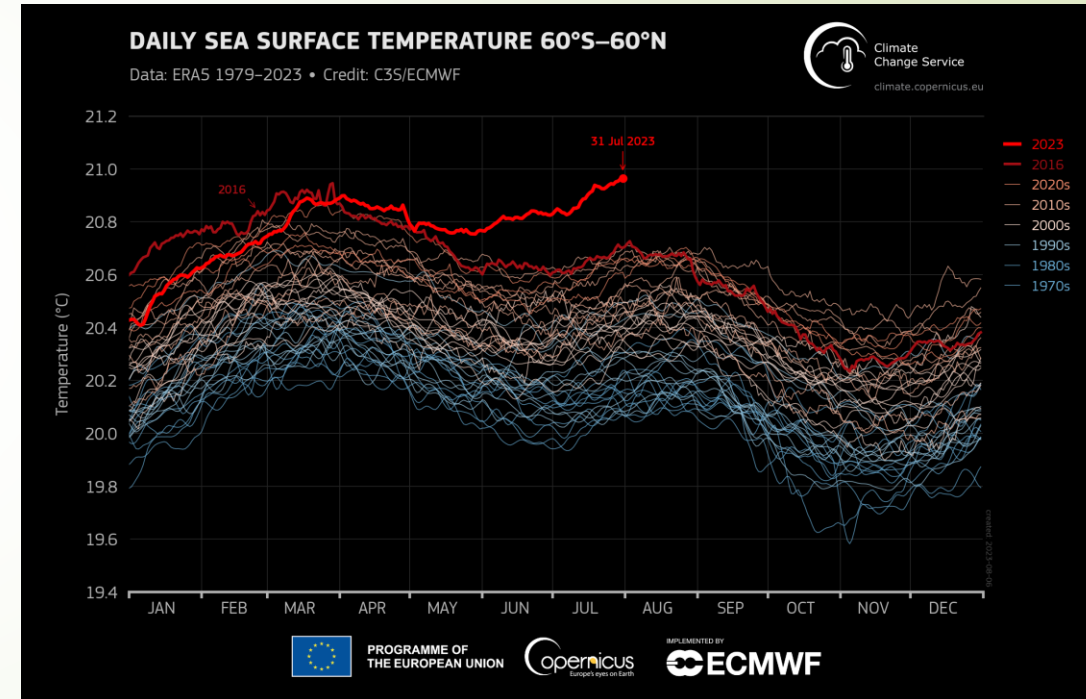
Hémisphère Nord

Hémisphère Sud

Global

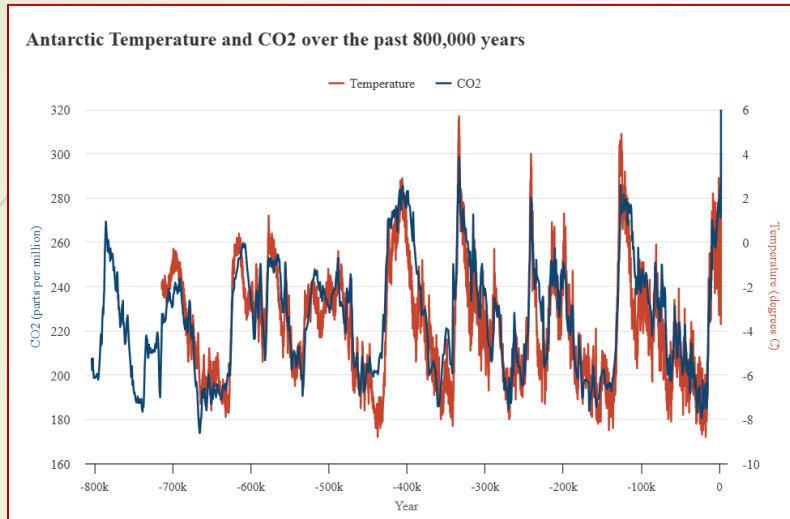
Source [crudata.uea.ac.uk](http://crudata.uea.ac.uk)

## Évolution annuelle



# Corrélation : taux de CO2 et température globale

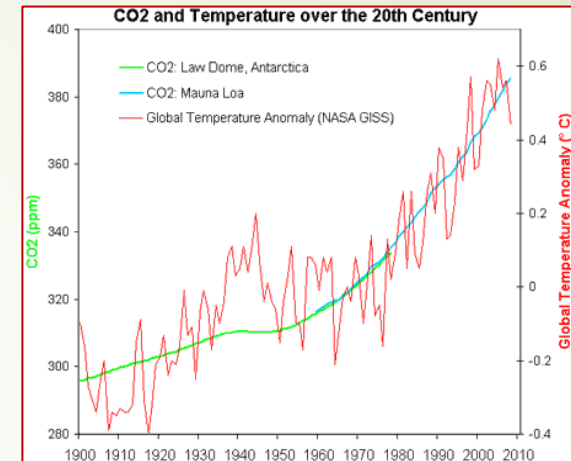
36



Carottage des glaces – [Carbonbrief.org](https://www.carbonbrief.org) (2020)

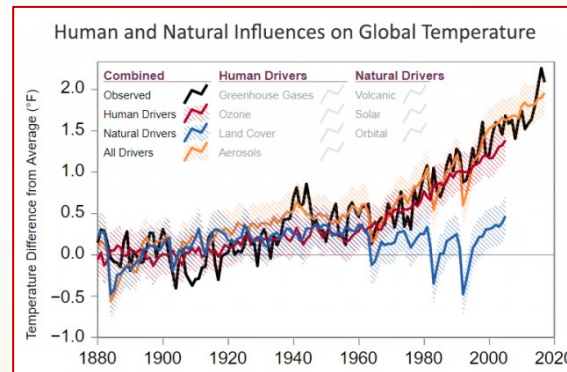
## Corrélation et causalité ?

Dans le passé, le taux de CO2 **suit** les évolutions de la température induite par les phénomènes cosmiques



Anomalies de la température globale – Taux de CO<sub>2</sub> (source [Nasa.GISS](https://www.nasa.gov))

*“Since the 1950s, it is extremely likely (> 95%) that human activities have been the dominant cause of that warming” (epa.gov)*



Source [epa.gov](https://www.epa.gov)

La contribution humaine cumulée depuis l'ère industrielle 130 ppm (CO<sub>2</sub>)

- Les modèles actuels prédisent une croissance de l'entropie de l'univers vers un état très froid, très dilué où la matière aura disparu.
- Actuellement la majorité de l'entropie de l'Univers observable est dans les trous noirs (stellaires ou supermassifs), qui s'évaporeront sur le très long terme
- L'énergie reçue du Soleil ( $340\text{W/m}^2$ ) est rediffusée directement (30% albedo), mais surtout réémise sous forme d'infra-rouge (70%). Le modèle du « corps noir » s'applique bien pour le Soleil ; pour la Terre, il faut tenir compte de son atmosphère.
- L'effet de serre induit par certaines molécules de l'atmosphère se traduit par une augmentation de la température observée de la Terre par rapport à celle du corps noir équivalent.
- L'entropie créée par la Terre correspond à la transformation du rayonnement solaire reçu (basse entropie) en chaleur basse température et à la création d'énergie libre dans son atmosphère.
- L'énergie libre créée correspond à moins de 10% de l'énergie reçue du Soleil ; elle est la source des phénomènes géologiques et biologiques sur notre planète ; une petite partie (qq %) est utilisée par l'humanité pour sa survie et la fabrication d'artefacts (énergies en flux « dites renouvelables » )
- Sans l'effet de serre, le surplus d'énergie/entropie dégagé par l'utilisation des énergies fossiles aurait une faible incidence sur l'équilibre thermodynamique de la Terre.

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 La planète Terre et l'Univers »  
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/>