

Géorressources, énergies et transitions

*Des nuages moléculaires
interstellaires aux étoiles*

*Naissance
d'une étoile*

*Transformer de l'énergie
gravitationnelle en chaleur*

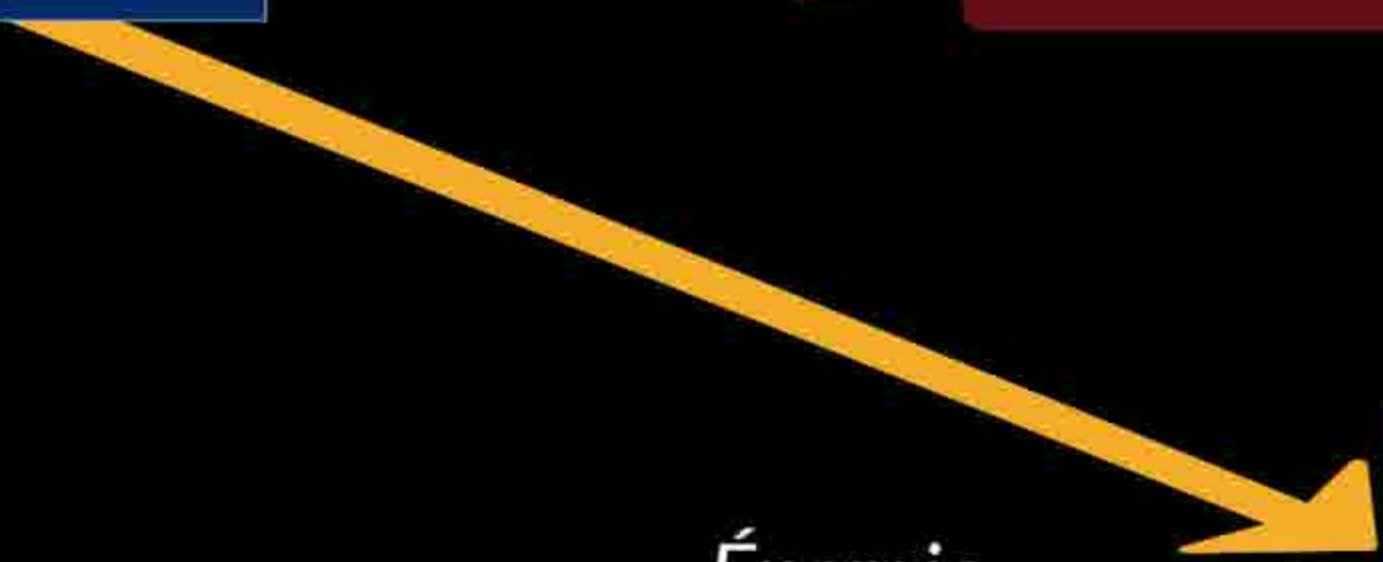
Énergie
gravitationnelle

Énergie
"haute
qualité"

Effondrement
des nuages
moléculaires

Énergie
"basse
qualité"

Chaleur



Mais ces transformations
énergétiques ouvrent la
voie vers des processus
beaucoup plus puissants



Les étoiles

Vers un autre processus de
conversion énergétique
beaucoup plus puissant

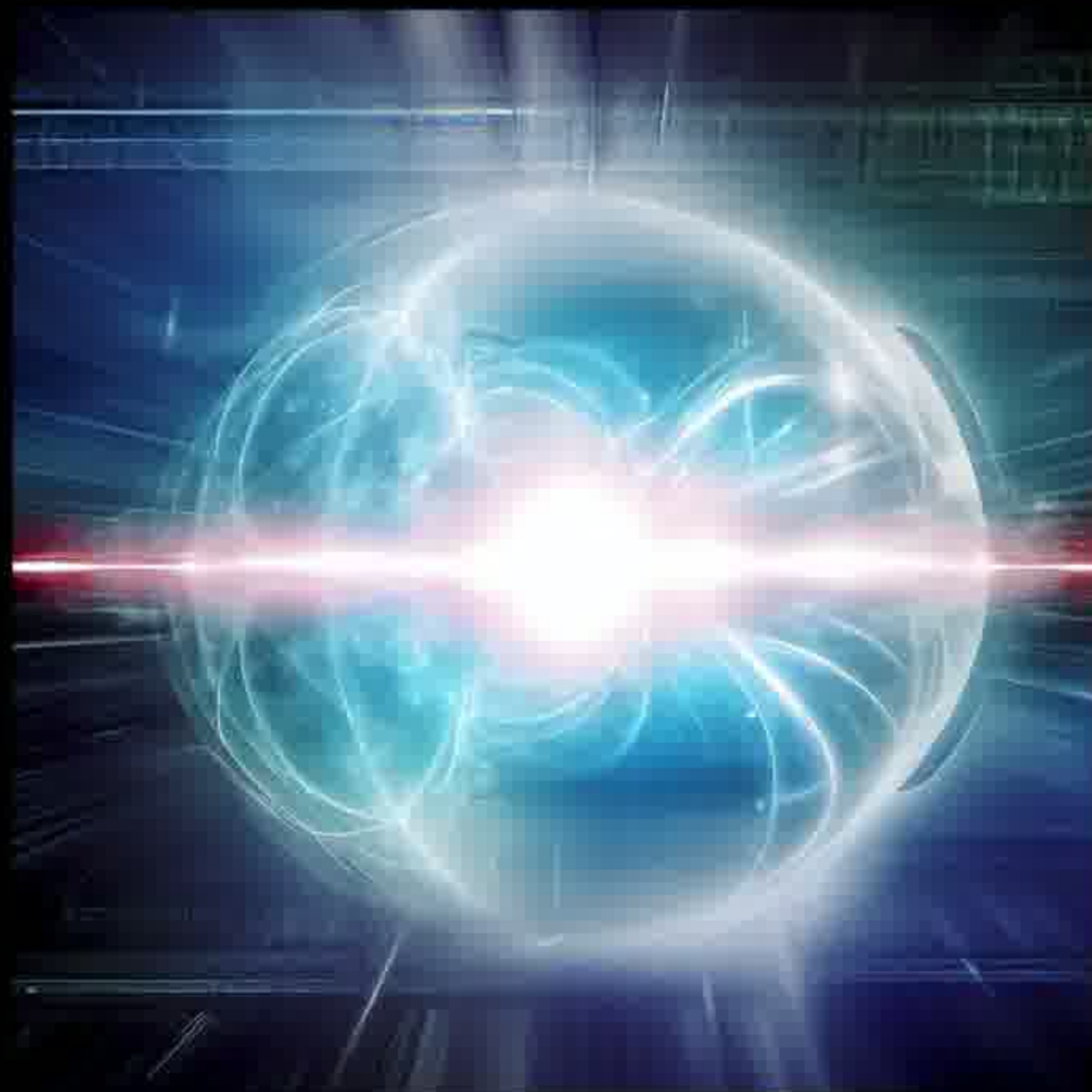


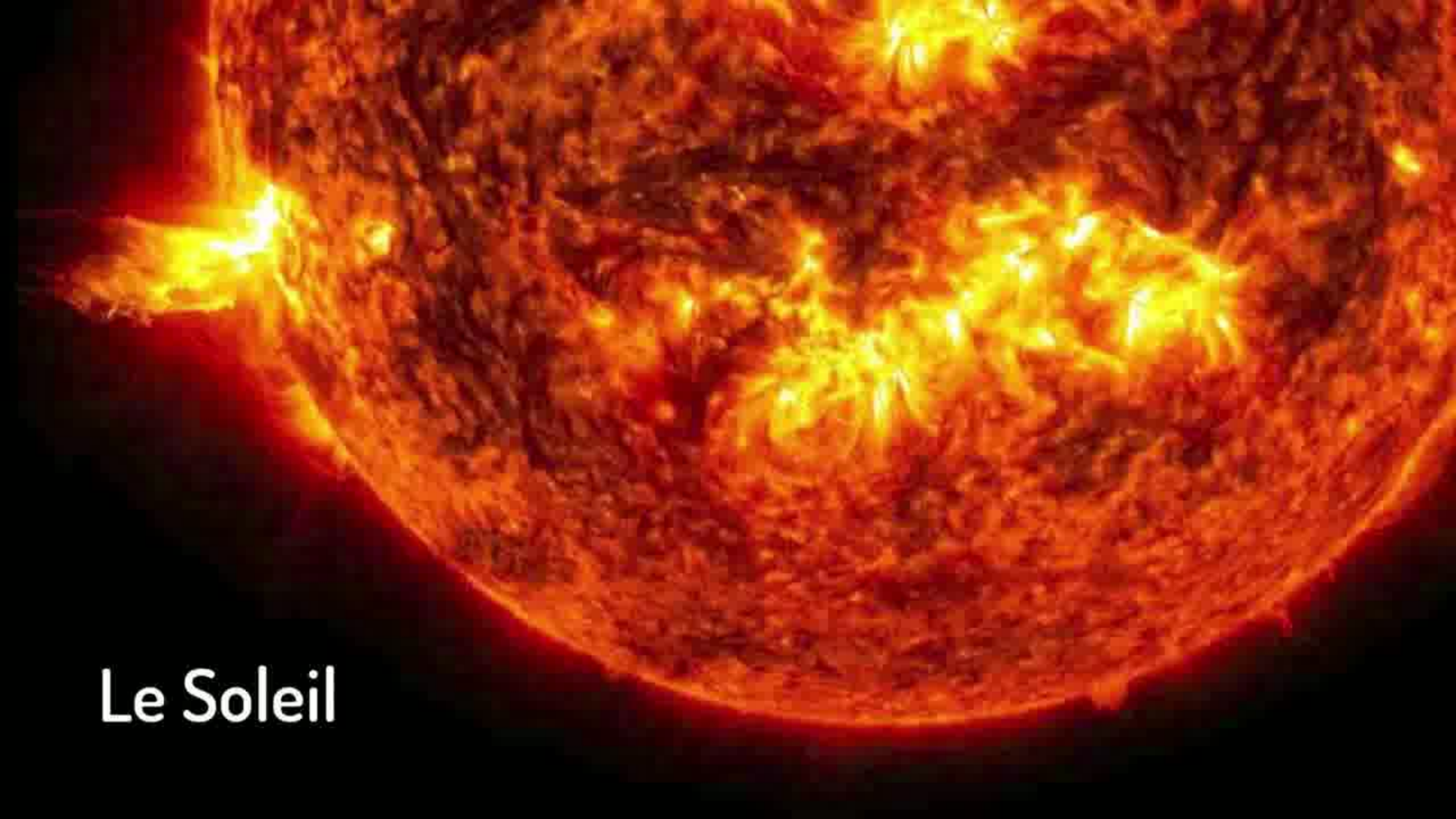
Bételgeuse

Transformer de la
masse en énergie
thermique et en
rayonnements
électromagnétiques



Fusion de noyaux
d'hydrogène en
noyaux d'hélium

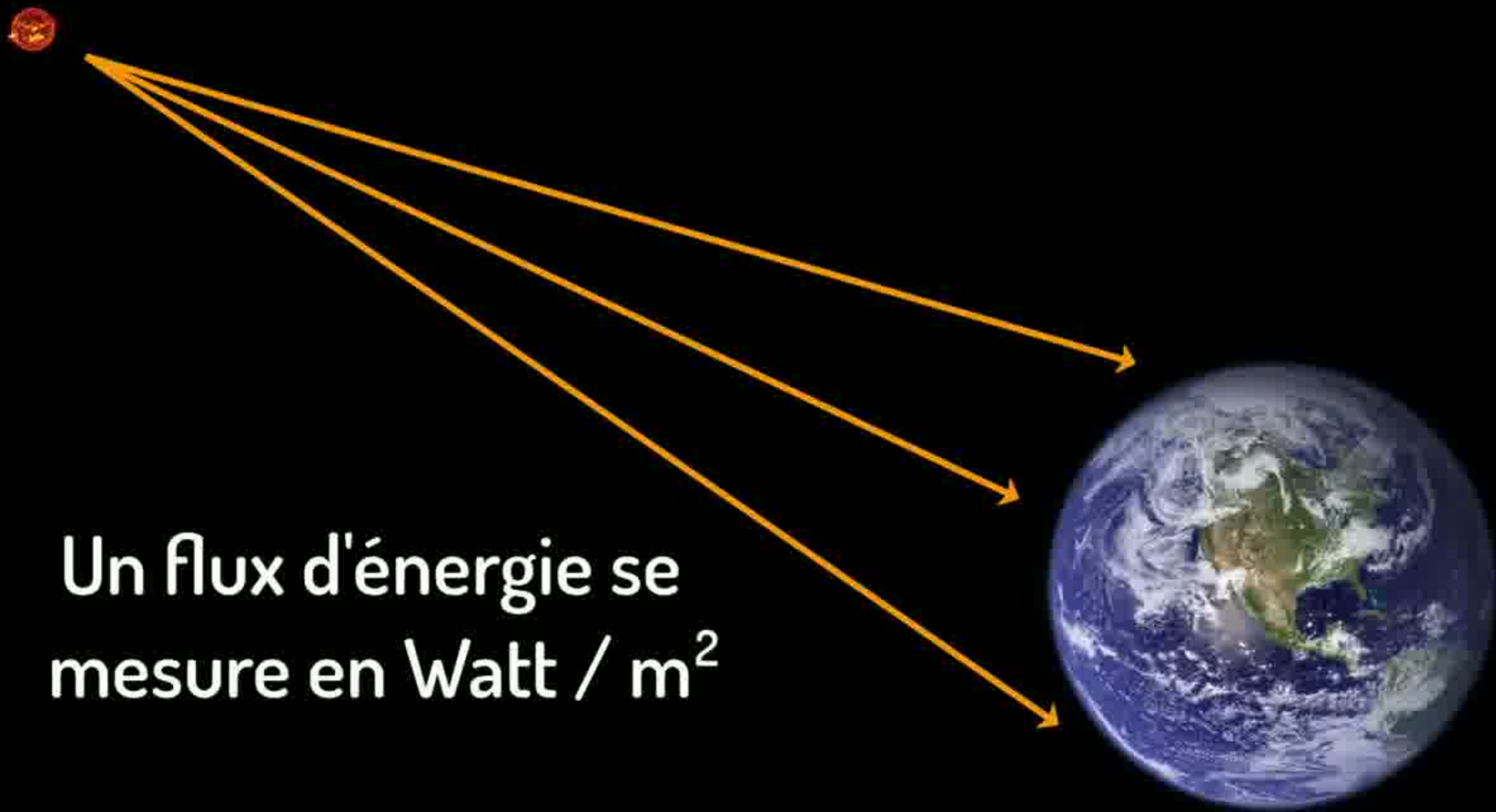




Le Soleil



Flux d'énergie sous
forme de
rayonnements
électromagnétiques

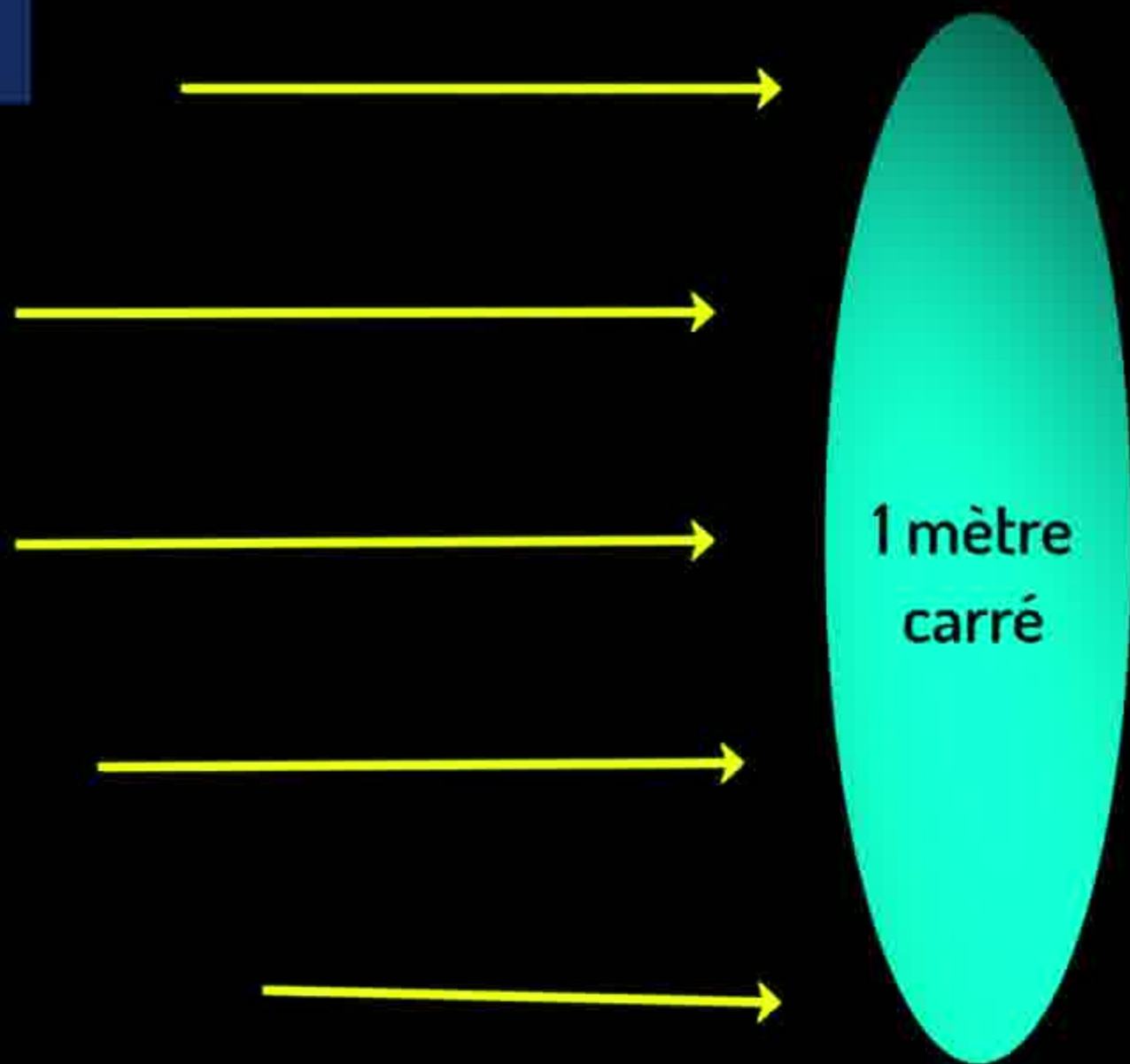


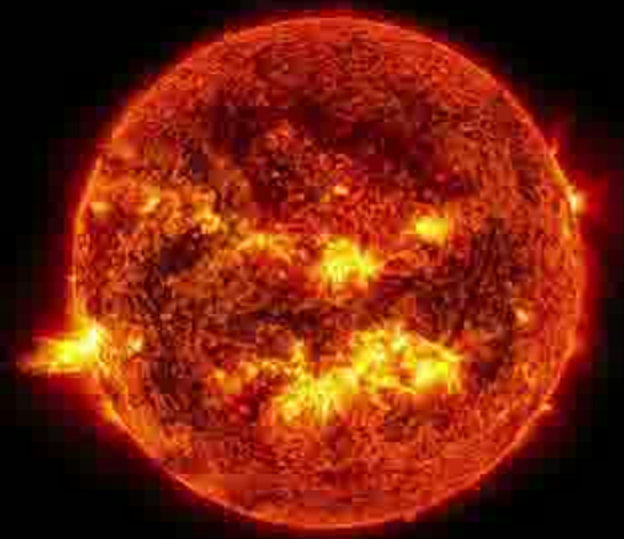
Un flux d'énergie se
mesure en Watt / m²

La constante solaire

Flux d'énergie reçu par un
mètre carré de surface
terrestre orienté
perpendiculairement aux
rayons solaires et en l'absence
d'atmosphère

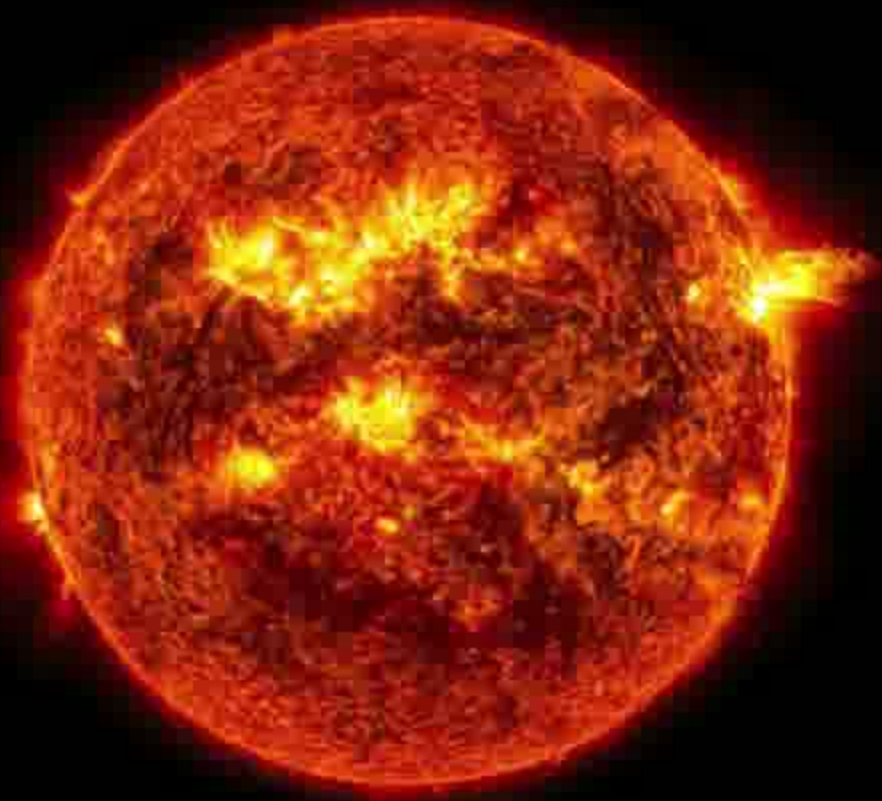
$$L = 1370 \text{ W/m}^2$$



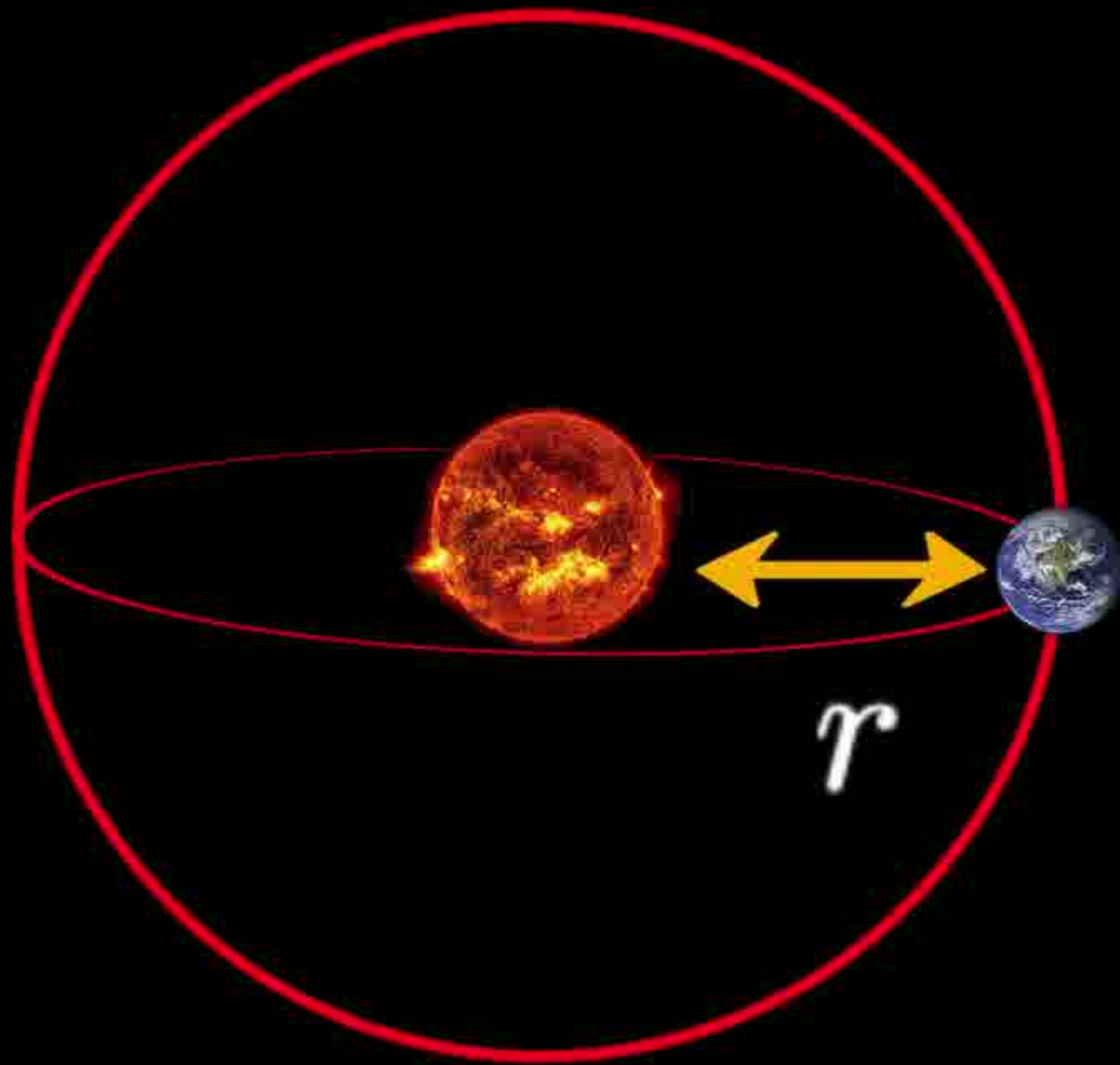


Quelle est la valeur
de la puissance totale
rayonnée par le Soleil ?

Quelle est la valeur
de la puissance totale
rayonnée par le Soleil ?



Le flux reçu sur
Terre dépend de la
distance Terre-Soleil



Surface d'une
sphère de rayon r

$$P = 4\pi r^2 L$$

P , puissance solaire

L , constante solaire

r , distance Terre-Soleil

150 millions de km



Puissance énergétique du Soleil

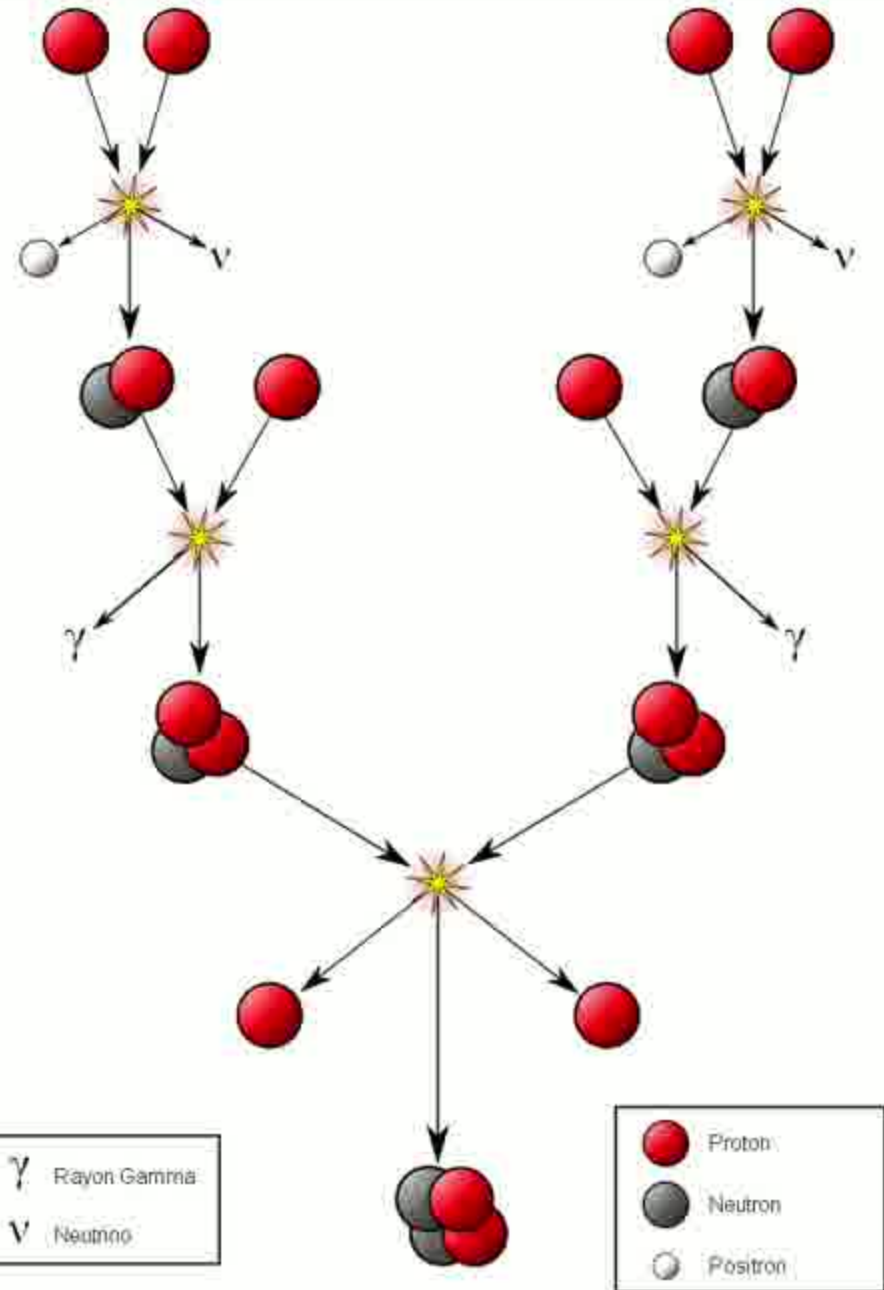
$$P = 3.87 \times 10^{26} \text{ J}$$

$$P \simeq 3.9 \times 10^{26} \text{ J}$$

Fusion nucléaire de 4 noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium 4



4 protons



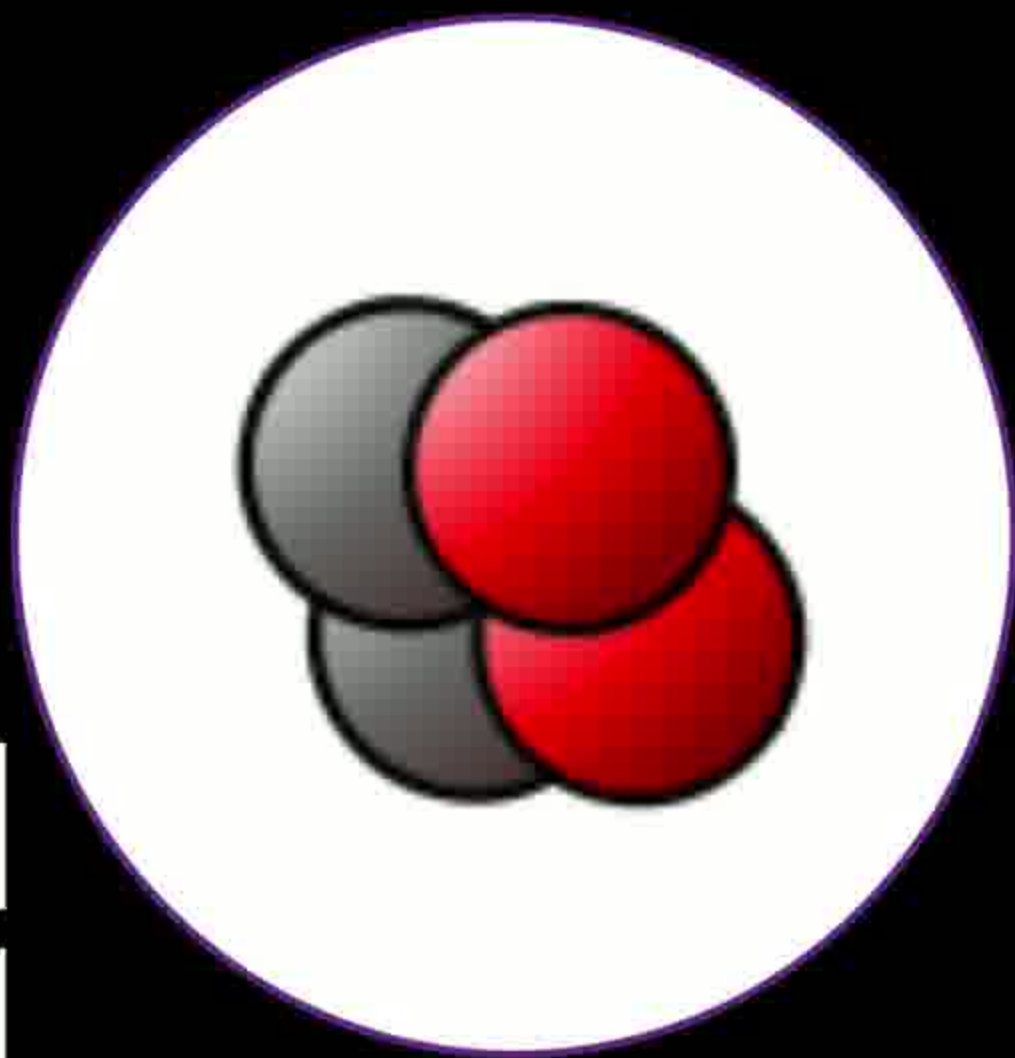
Un noyau d'Helium 4

= une particule alpha

4 nucléons

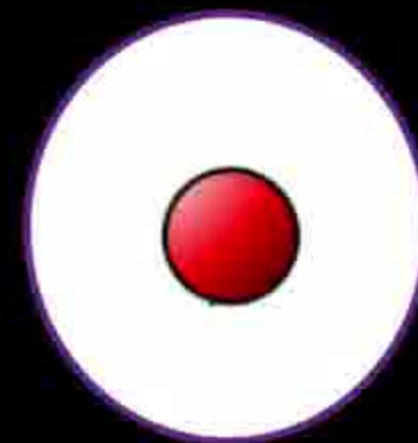
2 protons

2 neutrons





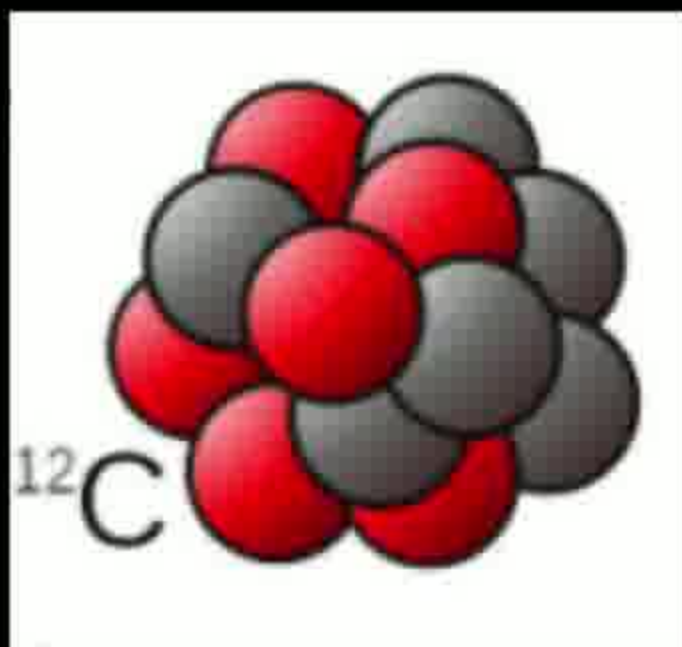
$$m \left({}^4_2\text{He} \right) = 4.00260 \, u$$



$$m \left(p \right) = 1.00727 \, u$$

L'unité de masse atomique (u)

unité de masse très commode pour les noyaux atomiques

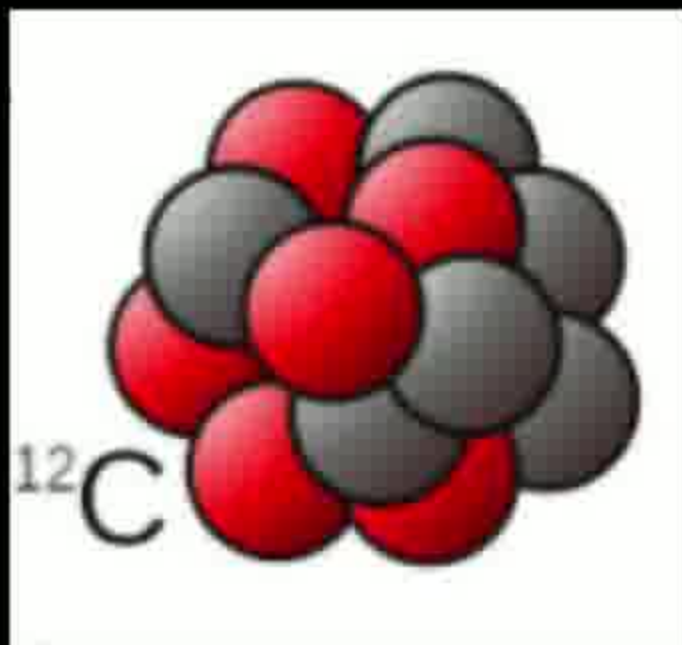


= 1/12 de la masse de l'atome de carbone 12

$$1\ u = 1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

Dans le monde de l'infiniment petit

$$1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}$$

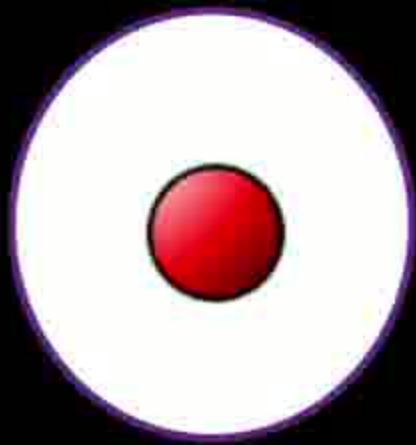


$$\text{Rayon proton} = 0.877\text{ fm} = 0.877 \times 10^{-15}\text{ m}$$

le femtomètre

Dans le monde de l'infiniment petit

Quelle est la masse volumique ou densité d'un proton ?



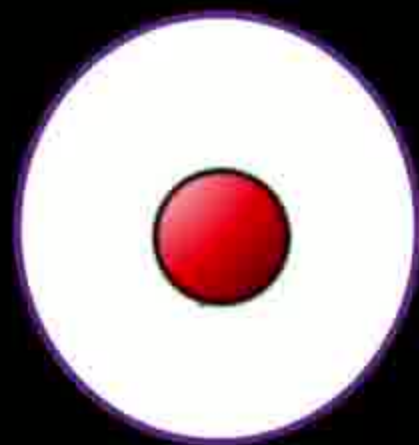
$$m(p) = 1.00727 u$$

$$\text{Rayon proton} = 0.877 \text{ fm} = 0.877 \times 10^{-15} \text{ m}$$

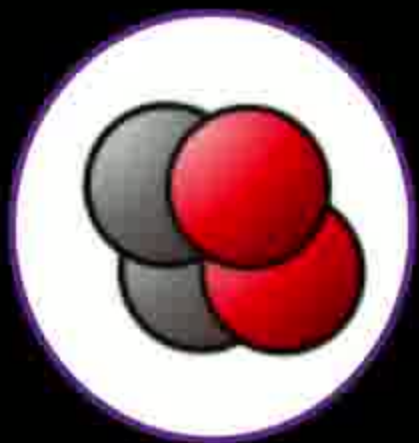
$$\text{Masse volumique proton} = 6 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masse volumique proton} = 6 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

Densité d'un proton : 600 000 milliards

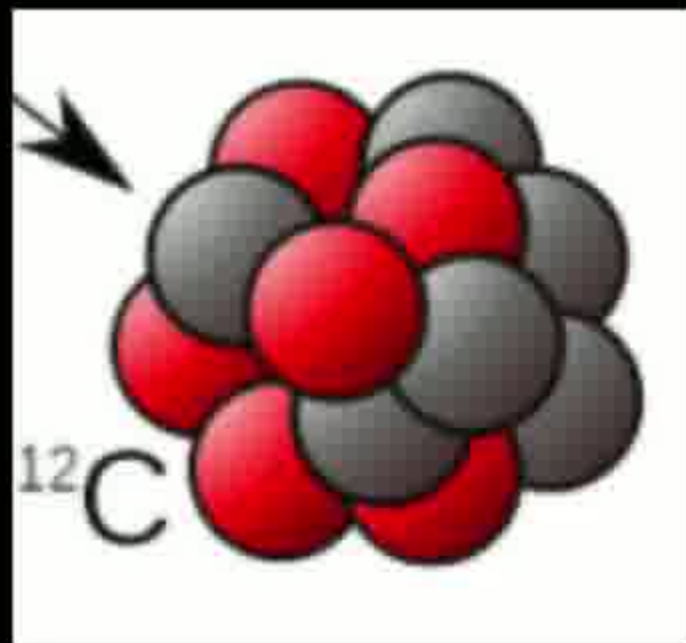


Proton



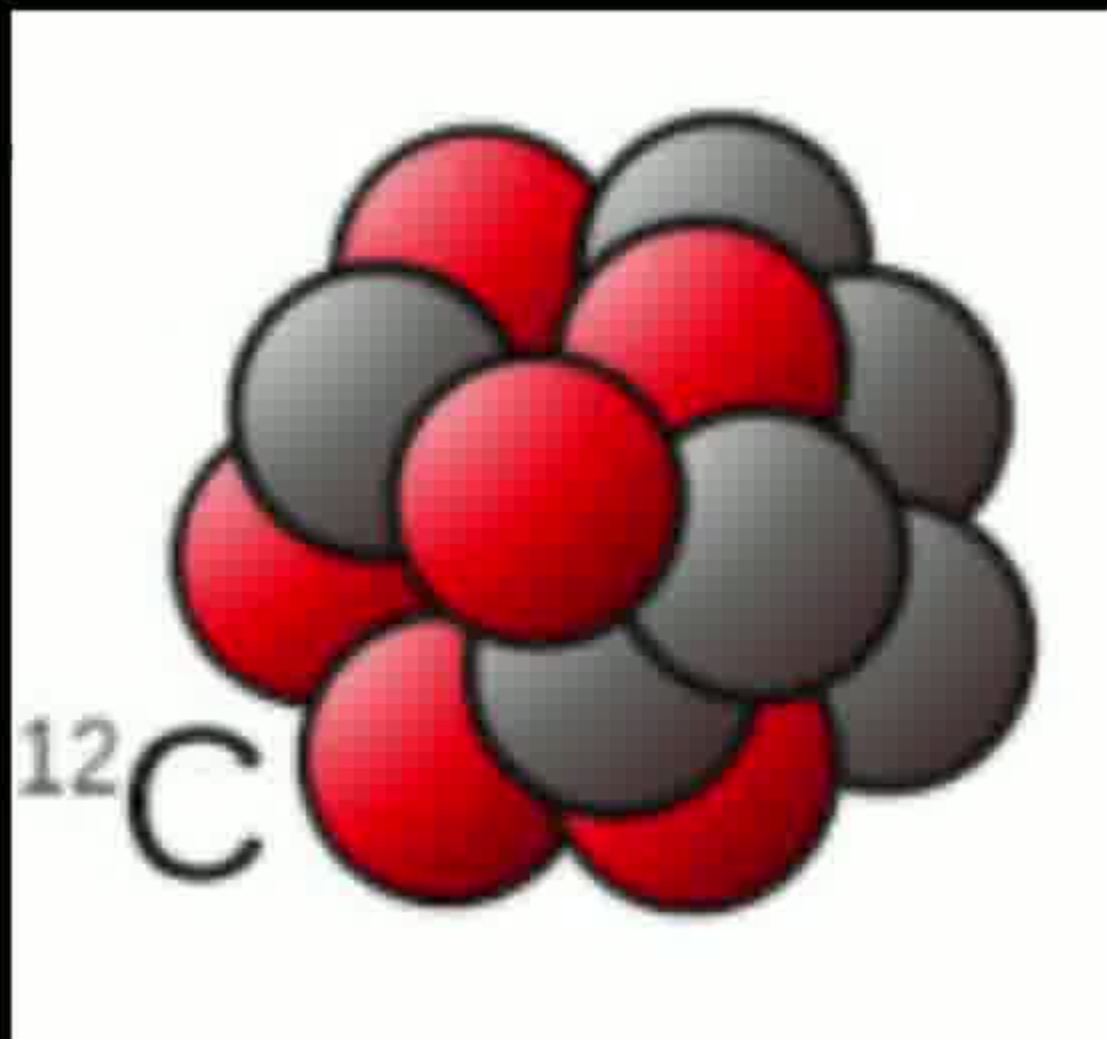
Hélium 4

Nucléons plus lourds



Carbone 12

Nucléons plus légers

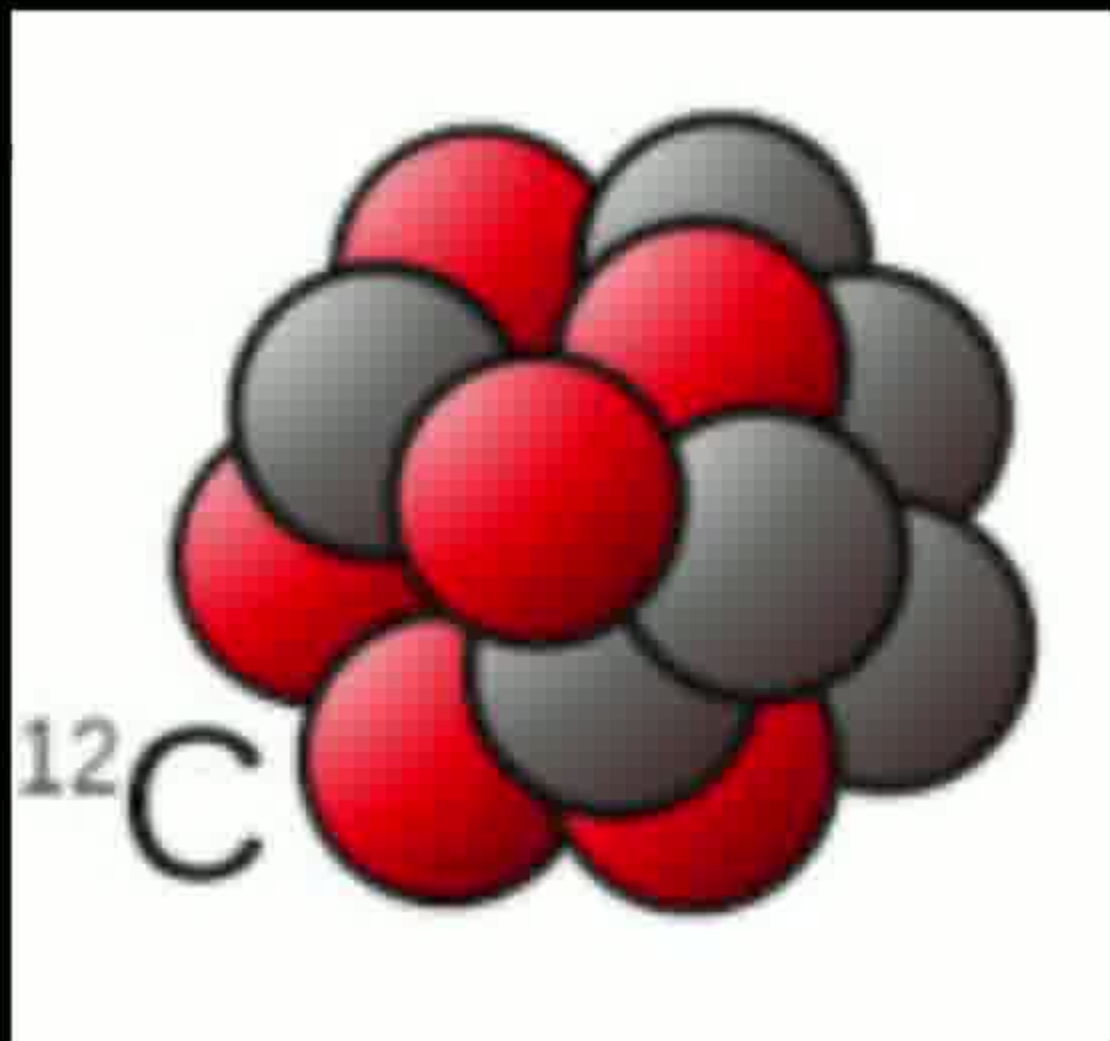


Des nucléons plus légers dans des noyaux plus lourds ...

Ces nucléons plus légers ont perdu de l'énergie stockée sous forme nucléaire

Et cette énergie perdue est partie sous forme de chaleur dans l'environnement

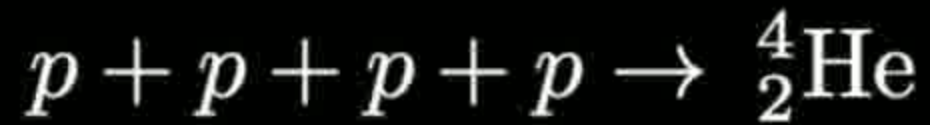
En accord avec le 2nd principe de la thermodynamique, un noyau de carbone 12 est plus stable qu'un noyau d'hélium 4 ou un noyau d'hydrogène



Des nucléons plus légers dans
des noyaux plus lourds ...

Les noyaux constitués de
nucléons plus légers sont
plus stables, car ils ont
évacué une partie de leur
masse sous forme de chaleur

*(augmentation de l'entropie de l'univers en accord
avec le 2nd principe de la thermodynamique)*

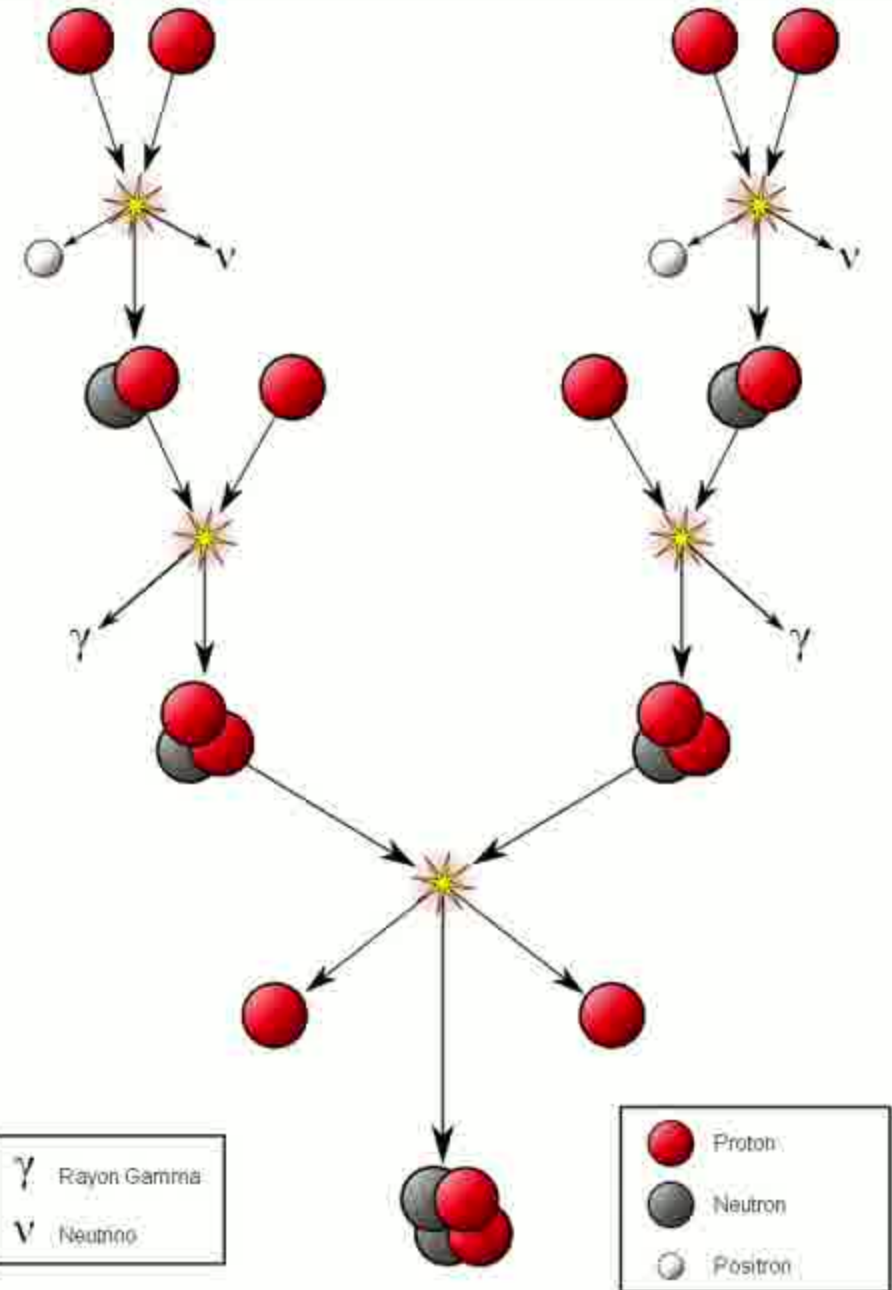


Fusion nucléaire avec perte de masse

Défaut de masse $\Delta m = 4.00260 - 4 \times 1.00727$

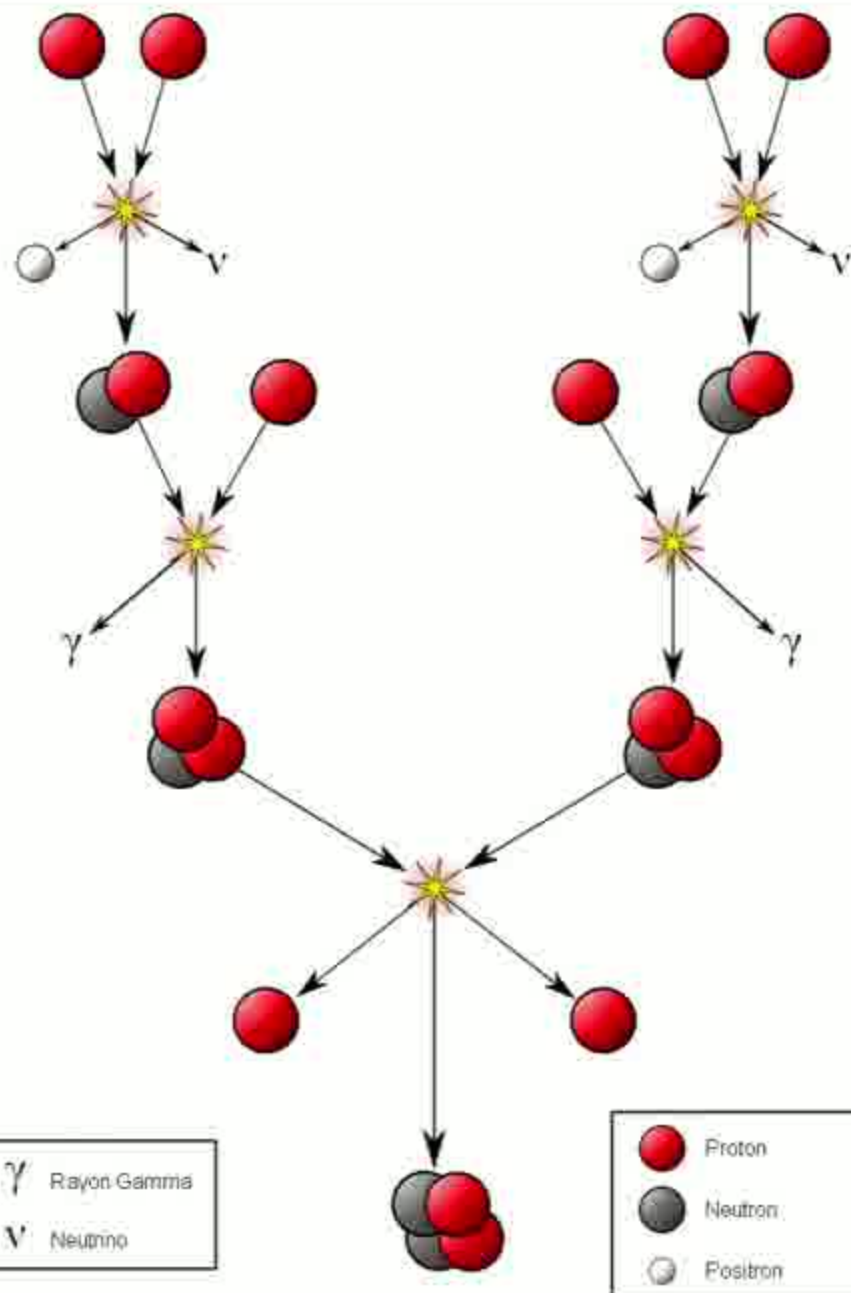
$$\Delta m = -0.0265 \text{ u}$$

$$\frac{\Delta m}{m} = -0.66\% = -6.6 \text{ ‰}$$



Sur 100 grammes d'hydrogène,

on fabrique 99.34 gramme d'Hélium 4



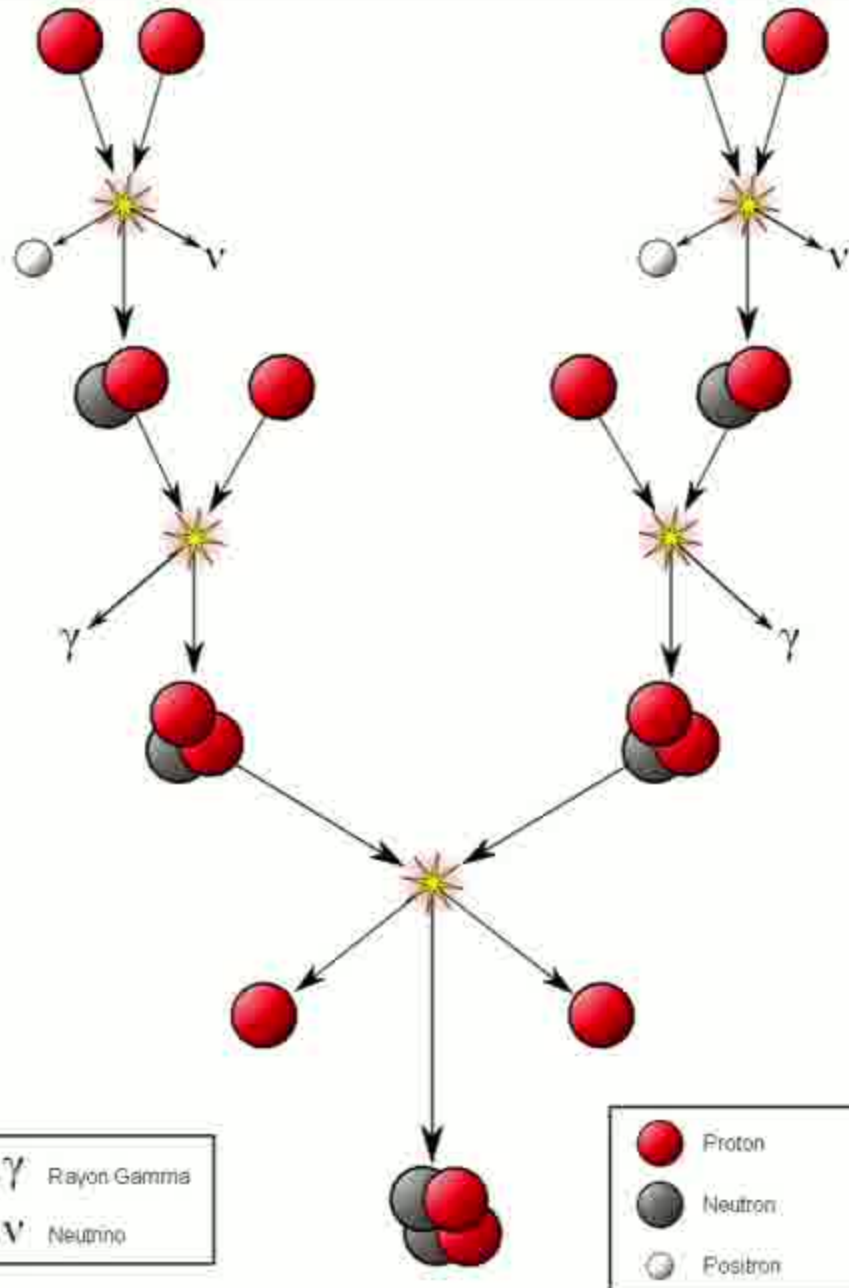
où sont
passés les
0.66 grammes
restant de
matière ???

Sur 100 grammes d'hydrogène,

on fabrique 99.34 gramme d'Hélium 4

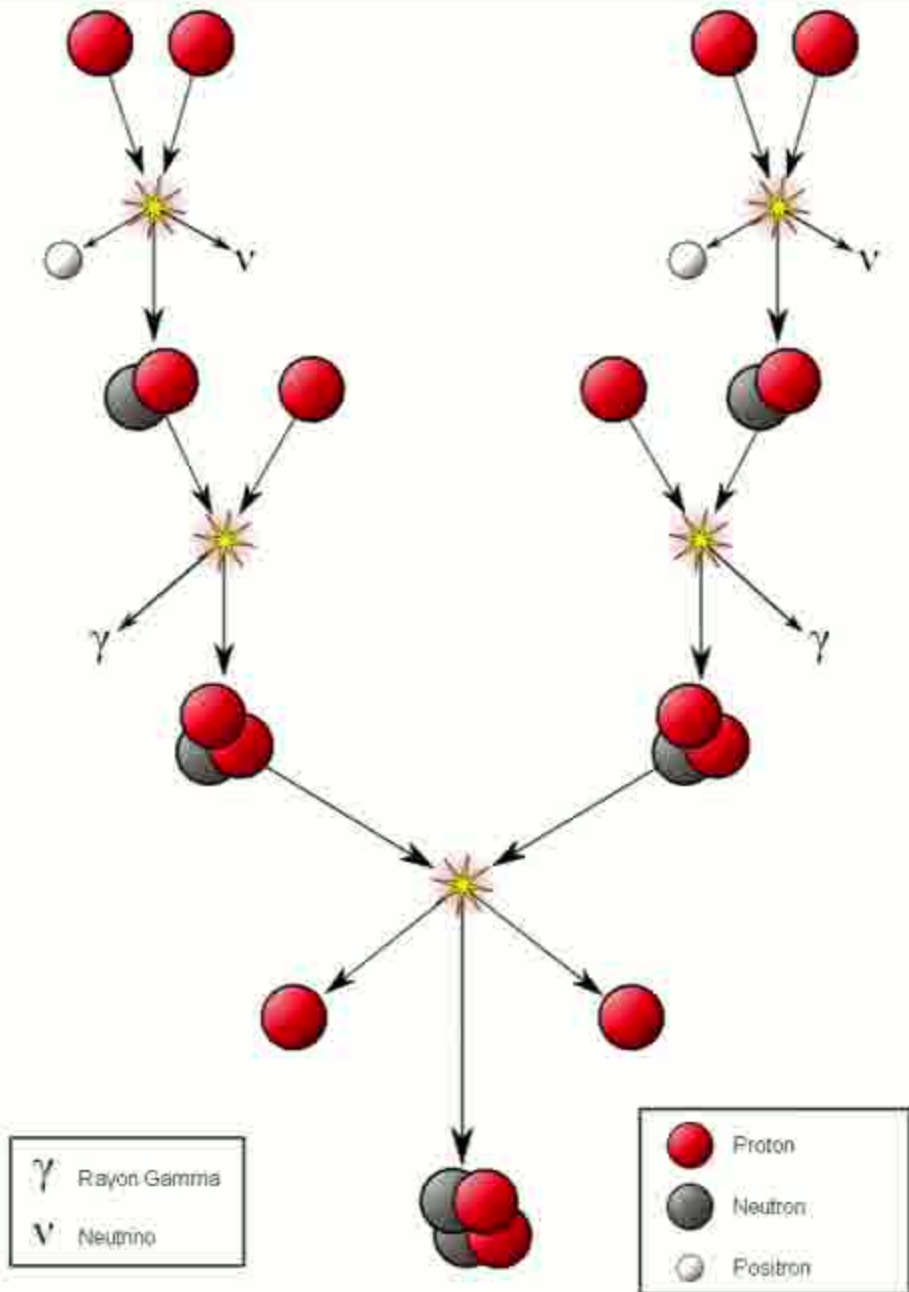
et on a perdu 0.66 grammes de matière,
partis sous forme de chaleur !

$$E = mc^2$$



La fusion nucléaire d'un gramme
d'hydrogène monoatomique fournit ...

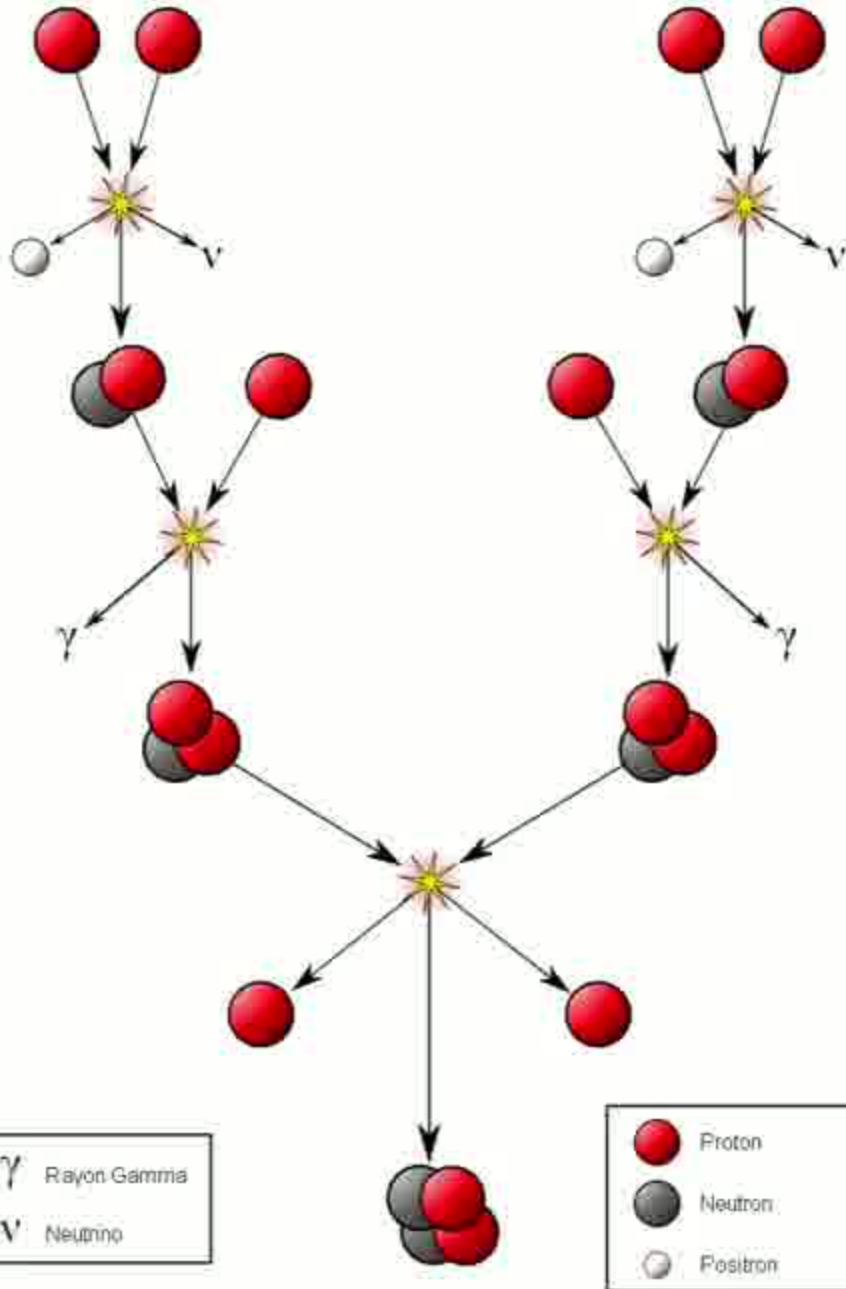
600 milliards de Joule



La fusion nucléaire d'un gramme
d'hydrogène monoatomique fournit ...

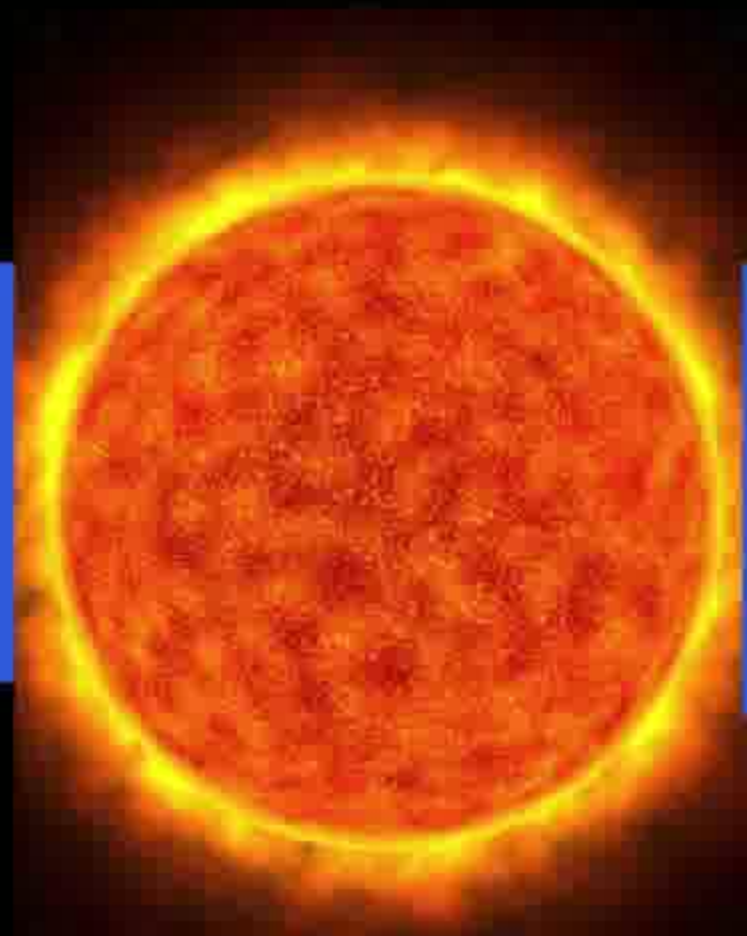
600 milliards de Joule

600 millions de kiloJoule



Hydrogen
Flame
($\phi = 0.4$)

La combustion
d'un gramme de
dihydrogène H_2
fournit 142 kJ



La fusion nucléaire
d'un gramme
d'hydrogène
monoatomique fournit
600 millions de kJ

La fusion nucléaire de l'hydrogène est 4 millions de
fois plus élevée que la combustion

Le Soleil, c'est ...

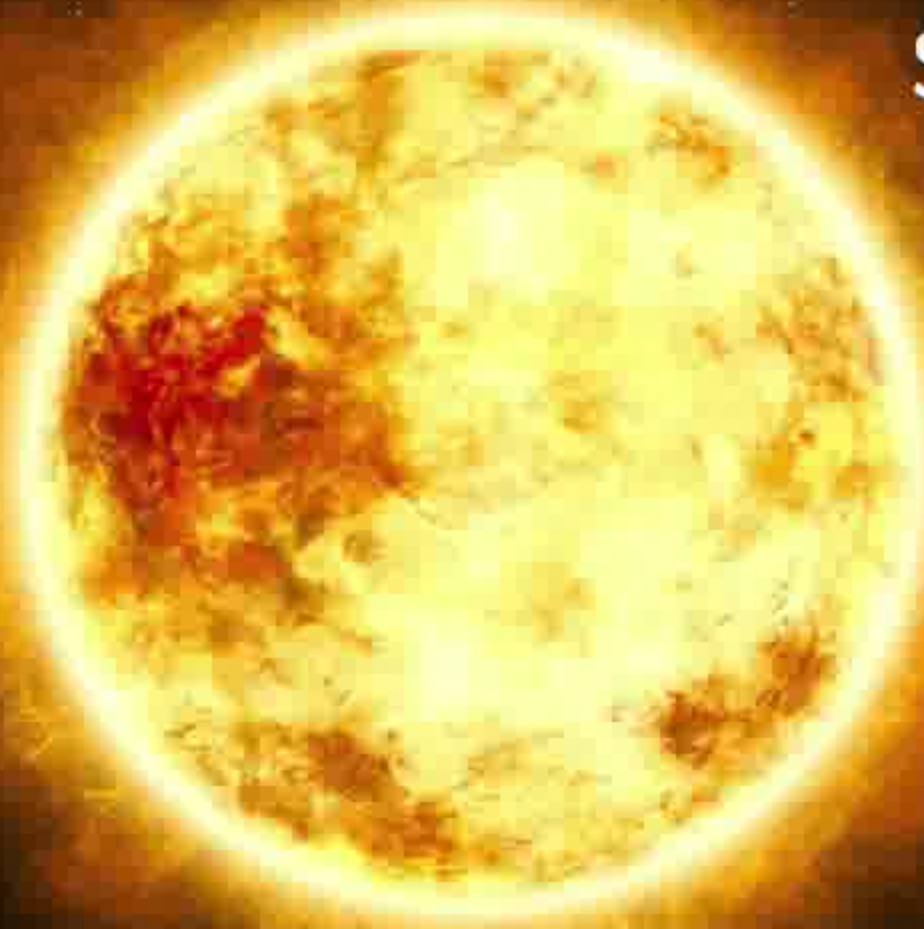
une masse
de 2×10^{30} kg

une
puissance
de 3.9×10^{26} W

avec un combustible
nucléaire de 600
millions de kJ/g



Question: combien de
kg d'hydrogène brûle le
Soleil en une seconde ?



La consommation énergétique du Soleil

$$\text{consommation par seconde} = \frac{3.9 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}}{6 \times 10^{11} \text{ J g}^{-1}}$$

$$\text{consommation par seconde} \simeq 6 \times 10^{14} \text{ g s}^{-1}$$

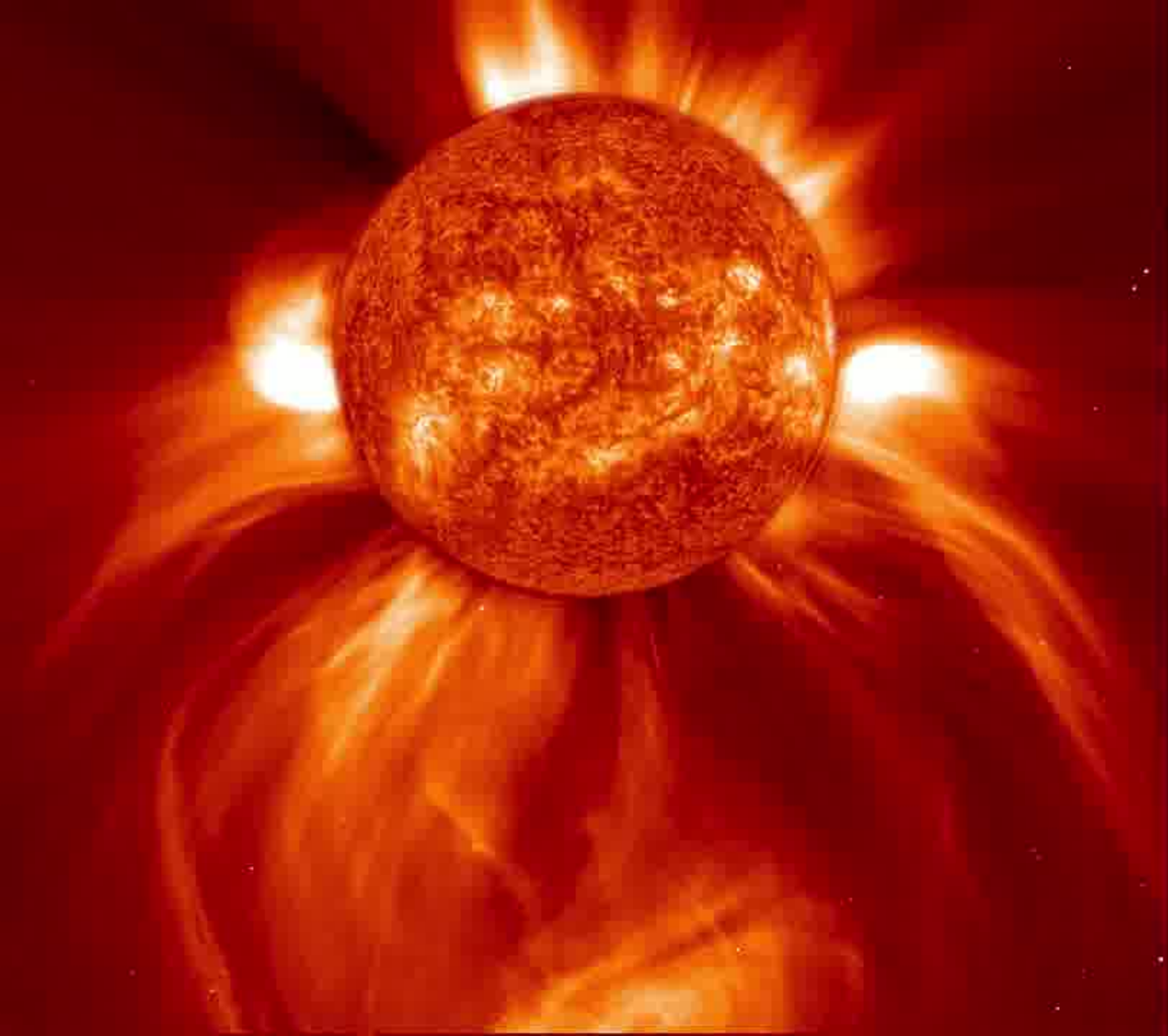
$$\text{consommation par seconde} = 6 \times 10^{11} \text{ kg s}^{-1}$$

Consommation en un an

$$2 \times 10^{19} \text{ kg}$$

Consommation en un
milliard d'années

$$2 \times 10^{28} \text{ kg}$$



Le Soleil consomme 1% de
sa masse en hydrogène
en un milliard d'année

A diagram on a black background. On the left is a large orange circle representing Aldebaran. To its right is a small yellow dot representing the Sun. The labels 'Soleil' and 'Aldébaran' are placed next to their respective objects.

Soleil

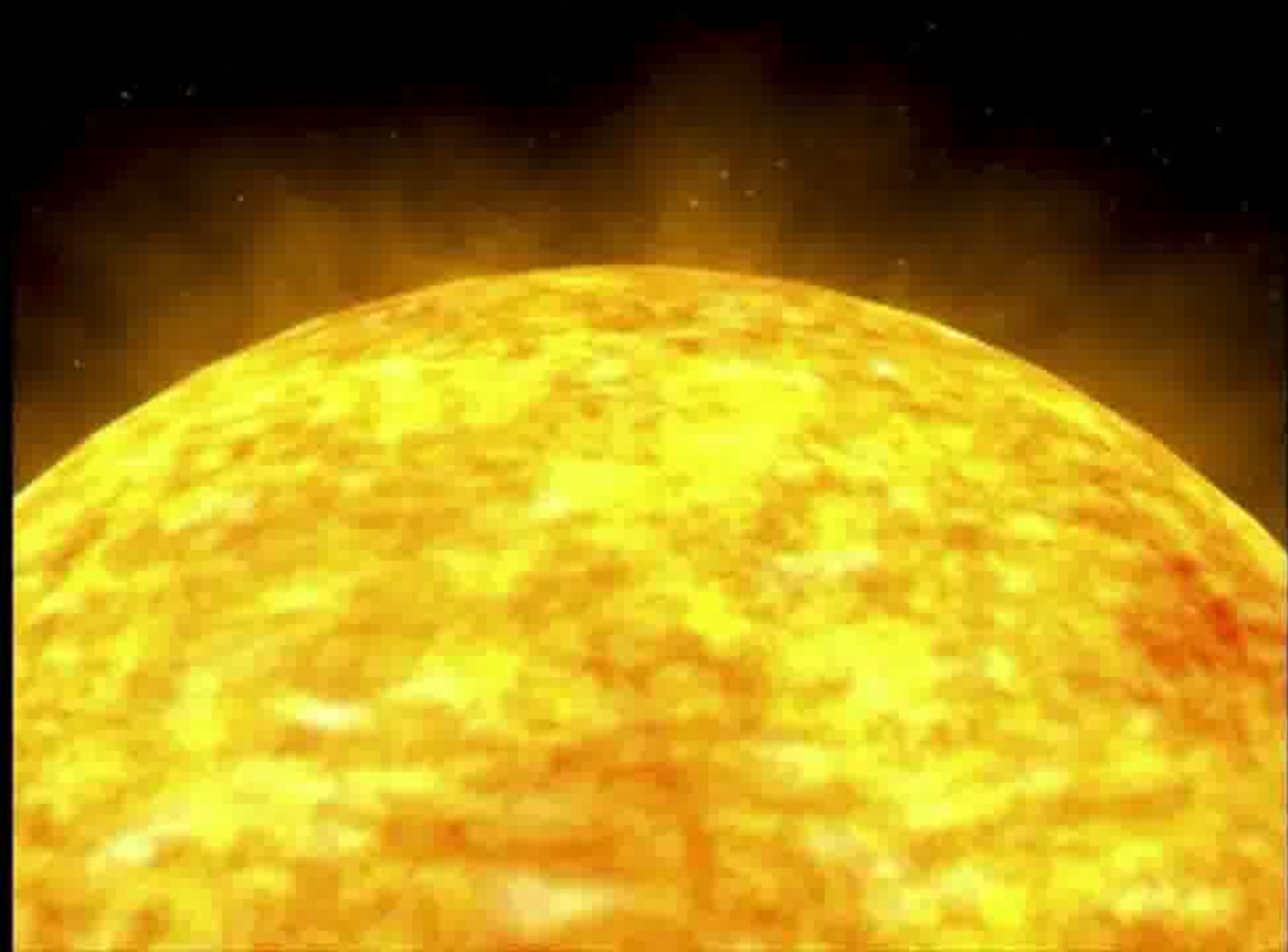


Aldébaran

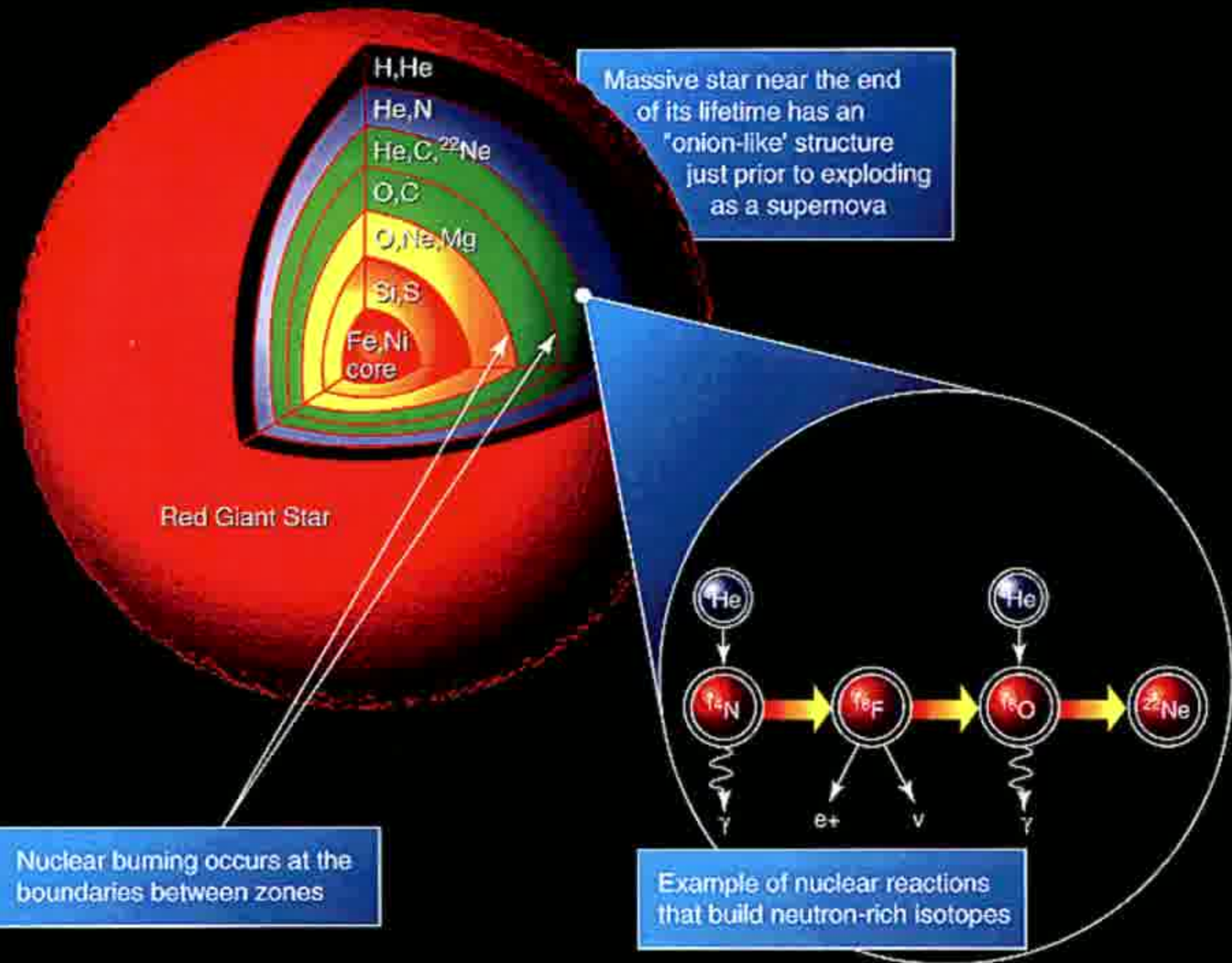
Le Soleil se transformera
en **géante rouge** quand il
aura consommé 10% de
son combustible

quand il sera âgé de 10 milliards d'année

c'est-à-dire dans 5 milliards d'année



La fusion nucléaire dans les géantes rouges



Quelle est l'intensité énergétique du Soleil ?



Quelle est l'intensité énergétique du Soleil ?

$$\text{Intensité énergétique} = \frac{4 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}}{2 \times 10^{30} \text{ kg}}$$

Puissance
énergétique exprimée
par unité de masse

Quelle est l'intensité énergétique du Soleil ?

$$\text{Intensité énergétique} = \frac{4 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}}{2 \times 10^{30} \text{ kg}}$$

$$\text{Intensité énergétique} = 2 \times 10^{-4} \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Intensité énergétique} = 0.0002 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

**Puissance
énergétique exprimée
par unité de masse**

L'intensité énergétique en erg/s/g ?

L'erg est une ancienne unité d'énergie

$$1 \text{ erg} = 1 \times 10^{-7} \text{ J}$$

L'intensité énergétique en erg/s/g ?

$$\text{Intensité énergétique} = 2 \times 10^{-4} \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

je multiplie
par 10^7 pour
avoir des erg

et je divise par 1000
pour avoir un résultat
pour 1 gramme

L'intensité énergétique en erg/s/g ?

$$\text{Intensité énergétique} = 2 \times 10^{-4} \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Intensité énergétique} = 2 \text{ erg/g/s}$$

De l'intensité énergétique des structures dissipatives

Le Soleil,
une structure dissipative

Energy Rate Density as a Complexity Metric and Evolutionary Driver

E. J. CHAISSON

Wright Center and Physics Department, Tufts University, Medford, Massachusetts and
Harvard College Observatory, Harvard University, Cambridge, Massachusetts

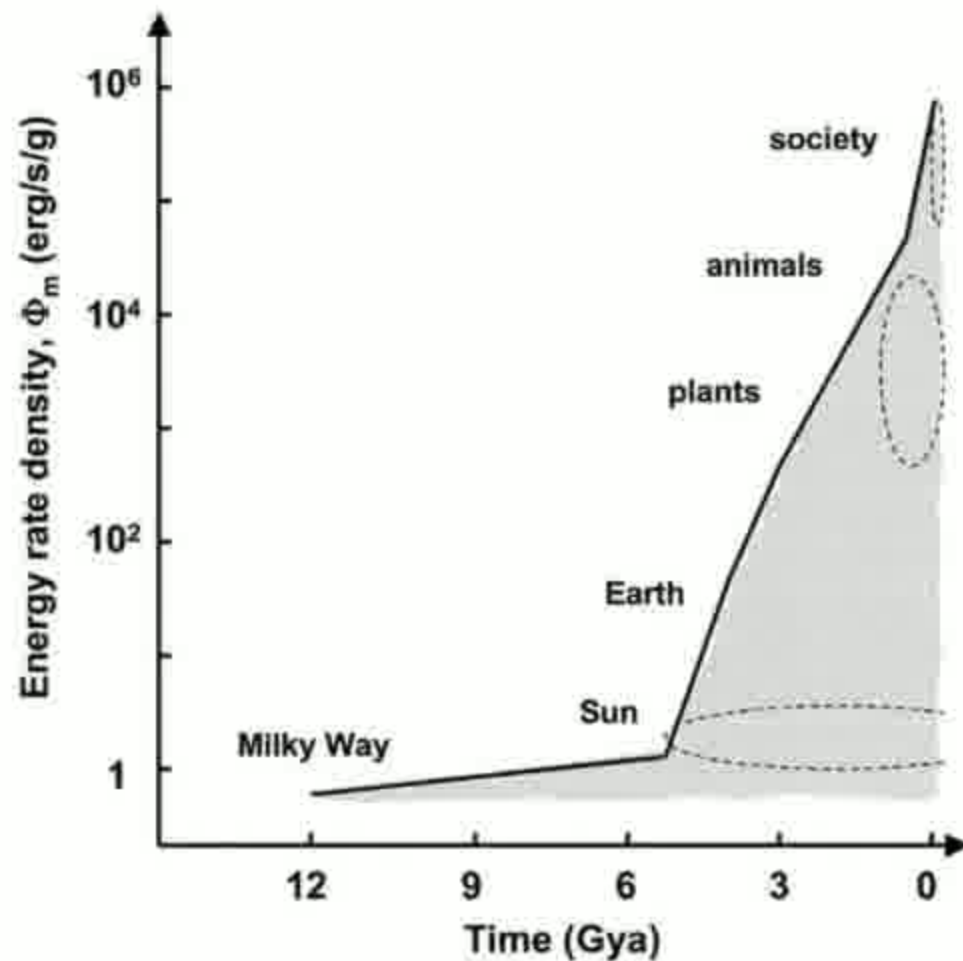


La complexité d'une structure dissipative se
mesure par son intensité énergétique

TABLE 1

Average Energy Rate Densities

System	Age (Gya)	Φ_m [erg/s/g]
Human society	0	500,000
Animals, generally	0.5	40,000
Plants, generally	3	900
Earth's geosphere	4	75
Sun	5	2
Milky Way	12	0.5



Energy rate densities, Φ_m , for those representative systems listed in Table 1, plotted here semilogarithmically at the time of their origin, display a clear increase for a wide spectrum of objects observed in Nature. The shaded area includes a whole array of Φ_m values as systems evolve. The three dashed ovals from bottom to top outline parts of this graph that are further explored in greater detail for physical, biological, and cultural evolution in Figures 3, 4, and 5, respectively.

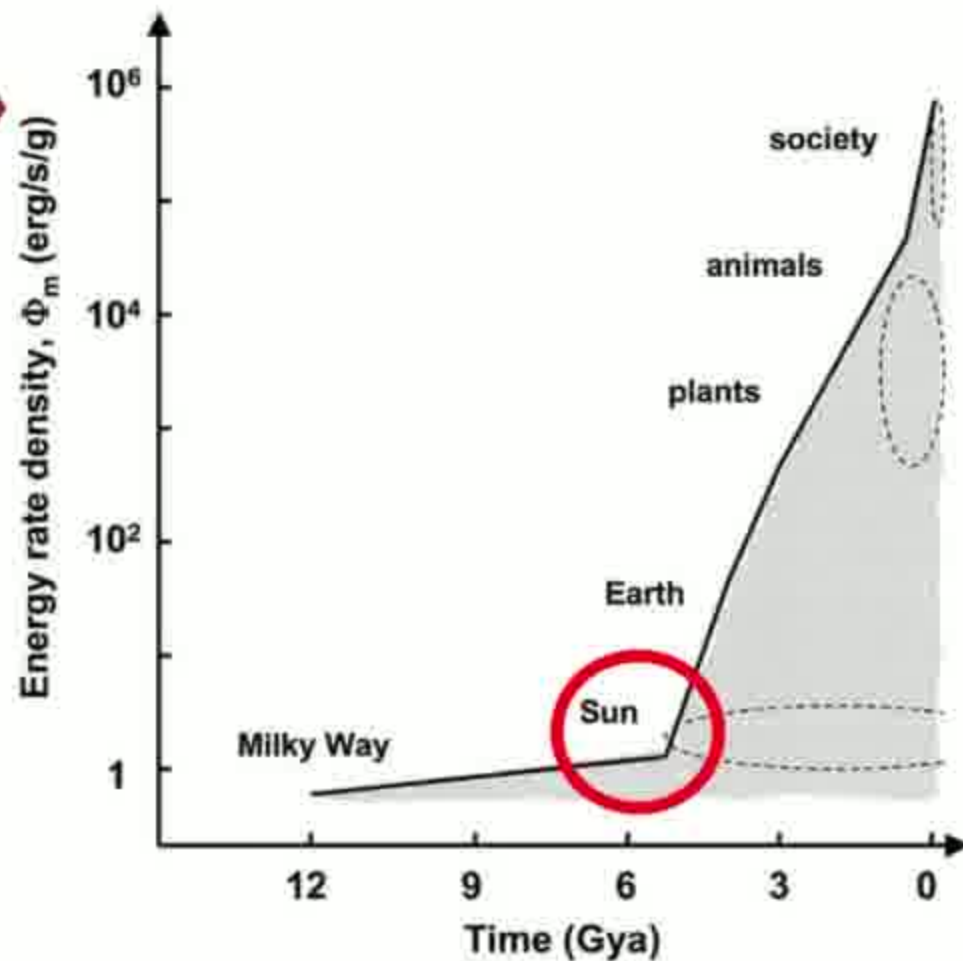
La courbe de l'évolution cosmique

TABLE 1

Average Energy Rate Densities

System	Age (Gya)	Φ_m [erg/s/g]
Human society	0	500,000
Animals, generally	0.5	40,000
Plants, generally	3	900
Earth's geosphere	4	75
Sun	5	2
Milky Way	12	0.5

Intensité
énergétique



Energy rate densities, Φ_m , for those representative systems listed in Table 1, plotted here semilogarithmically at the time of their origin, display a clear increase for a wide spectrum of objects observed in Nature. The shaded area includes a whole array of Φ_m values as systems evolve. The three dashed ovals from bottom to top outline parts of this graph that are further explored in greater detail for physical, biological, and cultural evolution in Figures 3, 4, and 5, respectively.