

## La source d'énergie des étoiles

A. Jorissen

Institut d'Astronomie et d'Astrophysique

<http://www.astro.ulb.ac.be>

Fascicule du professeur

(avec réponses en rouge)

Le but de cet atelier est de s'interroger sur la source d'énergie à l'œuvre dans le Soleil et les étoiles en général.

1. Rechercher l'origine de toutes les énergies utilisées sur Terre
2. Evaluer à partir de quantités accessibles par l'observation (« constante solaire » et unité astronomique de distance) le taux de production d'énergie dans le Soleil.
3. Rechercher quelles sont les formes d'énergie capables d'assurer ce rythme de production?  
(Réactions chimiques ou nucléaires)
4. Calcul du défaut de masse nucléaire et  $E = m c^2$  et calcul de la quantité (en millions de tonnes!) d'hydrogène convertis en  ${}^4\text{He}$  par seconde dans le Soleil.
5. Que se passe-t-il lorsque l'hydrogène central est épuisé?

## 1. INTRODUCTION

Toute l'énergie disponible sur Terre provient du Soleil (ou des étoiles). Le lien avec le Soleil n'est pourtant pas toujours très évident. Essayons d'énumérer les différentes sources d'énergie disponibles sur la Terre et d'identifier leur origine.

1. Energie solaire
  - a. Thermique
  - b. Photovoltaïque
2. Energie hydraulique  
C'est l'évaporation de l'eau de mer sous la chaleur solaire qui a amené l'eau en hauteur
3. Energie éolienne  
C'est l'énergie solaire qui a chauffé l'air, responsable des différences de pression à l'origine du vent.
4. Energie marémotrice  
C'est l'énergie **gravitationnelle** stockée dans le mouvement orbital de la Lune et du Soleil qui est à l'origine de la force marémotrice. En ce sens, elle est différente des précédentes.
5. Energie humaine  
Elle provient de l'alimentation, elle-même stockée sous forme de liaisons chimiques dans les molécules de sucre et graisse. En remontant la chaîne alimentaire, on se ramène aux végétaux dont la croissance est possible grâce à l'énergie tirée de la photosynthèse, elle-même alimentée par le rayonnement solaire.
6. Energies fossiles : gaz, charbon, pétrole  
Comme le point précédent, mais pour des végétaux enfouis et décomposés depuis des millions d'années.
7. Energie nucléaire de fission  
Sa nature est différente des précédentes, car elle émane de l'énergie stockée dans la cohésion des noyaux très lourds. Ces noyaux (comme l'uranium) ont été formés dans des explosions de type supernova et injectés dans la nébuleuse proto-solaire.
8. Energie géothermique et volcanique  
Elle est liée aux désintégrations des noyaux instables présents à l'intérieur de la Terre. Ces noyaux ont été produits par les étoiles avant la formation du Soleil et du système solaire, et injectés dans la nébuleuse proto-solaire avant sa formation.
9. Energie nucléaire de fusion  
C'est la seule à ne pas être liée directement au Soleil ou aux étoiles, mais à la structure intime de la matière, via la relation  $E = mc^2$ .  
**En fait, c'est la seule énergie de base, dont l'énergie rayonnée par le Soleil dérive elle-même !**

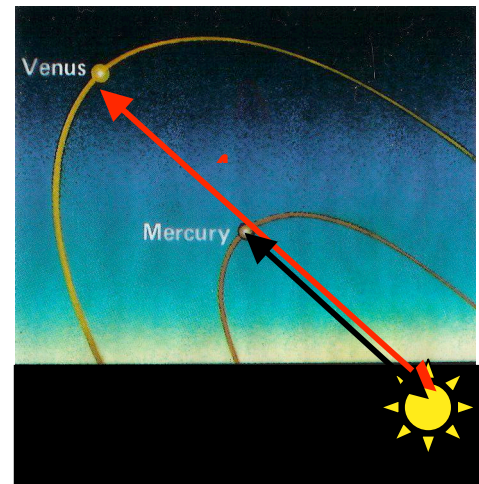
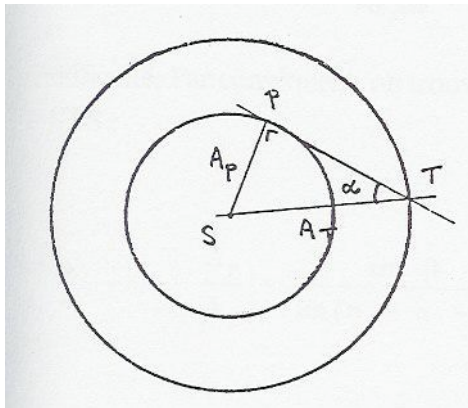
## 2. Evaluer à partir de quantités accessibles par l'observation le taux de production d'énergie dans le Soleil (= sa luminosité)

### 2.A. Valeur de l'UA en km

#### 2. A.1 Valeur du rayon de l'orbite de Vénus

##### 2. A.1.1 Elongation maximale des planètes intérieures

L'élongation maximale de Vénus est de 46.3276 degrés.  
Calculer son rayon (demi grand-axe) A (UA) =  $\sin 46.3276$



##### 2. A. 1.2. Troisième loi de Kepler

Compléter le tableau suivant :

	$P_{\text{orb}}$ (an)	A (UA)	$A^3/P^2$
Lune	0.075	0.00257	..
Mercure	0.24	0.387	..
Vénus	0.62	0.723	..
Terre	1	1	..
Mars	1.88	1.524	..
Jupiter	11.86	5.203	..
Saturne	29.46	9.54	..
Uranus	83.74	19.2184	..
Neptune	163.7232	30.11	..

Démontrer la troisième loi de Kepler  $A^3/P^2 = G (M+m) / 4\pi^2$  où P et A sont respectivement est la période orbitale et le rayon de l'orbite de la planète de masse m, M est la masse du Soleil. G est la constante de la gravitation universelle. Conseil : Egaliser l'accélération centripète dans une orbite circulaire à l'accélération gravitationnelle dans le référentiel accroché au Soleil.

La période orbitale de Vénus s'élève à 224.6818 jours terrestres.  
Calculer son rayon (demi grand-axe) A.

$$A_{\text{Venus}} = 0.7233 \text{ UA} = (224.6818/365.25)^{2/3}$$

## 2. A.2 Conversion de l'unité astronomique de distance en km : écho radar

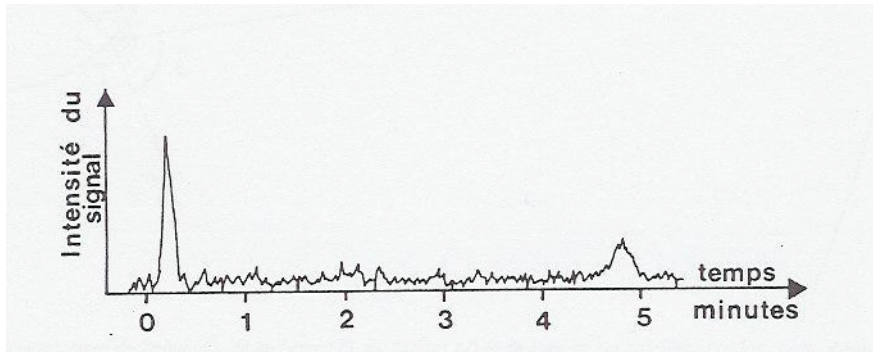


Figure 1. Echo renvoyé par Venus d'un signal radar envoyé depuis la Terre.  
La durée écoulée entre le signal et l'écho est de 275.9 secondes, soit 4.6 minutes.

Calculer la valeur de l'unité astronomique de distance dans le système international d'unités.

$$A_{\text{Venus}} = 0.7233$$

$$\text{Distance parcourue par le faisceau radar} = 2 \times (1 - 0.7233) = 0.5534 \text{ UA}$$

$$\text{A la vitesse de } 299\,792.458 \text{ km/s, soit } A = 149\,597\,870 \text{ km/s}$$

## 2.B. Masse du Soleil

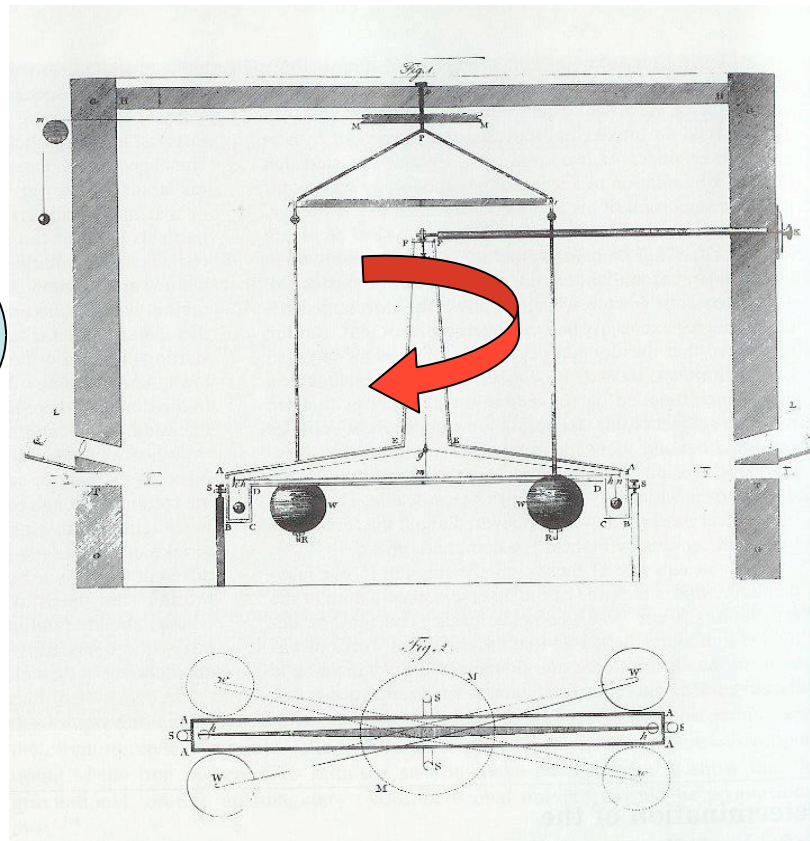
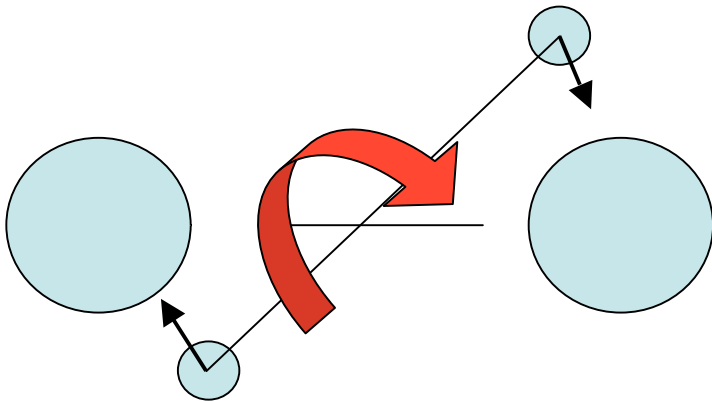
On peut déduire la masse du Soleil  $M$  de la troisième loi de Kepler  $A^3/P^2 = G (M+m) / 4\pi^2$  à condition de connaître les valeurs de  $G$  et  $A$  dans le système MKS.

Mesure de la constante de la gravitation  $G$  par Henry Cavendish (1731 - 1810) au moyen d'un pendule de torsion :

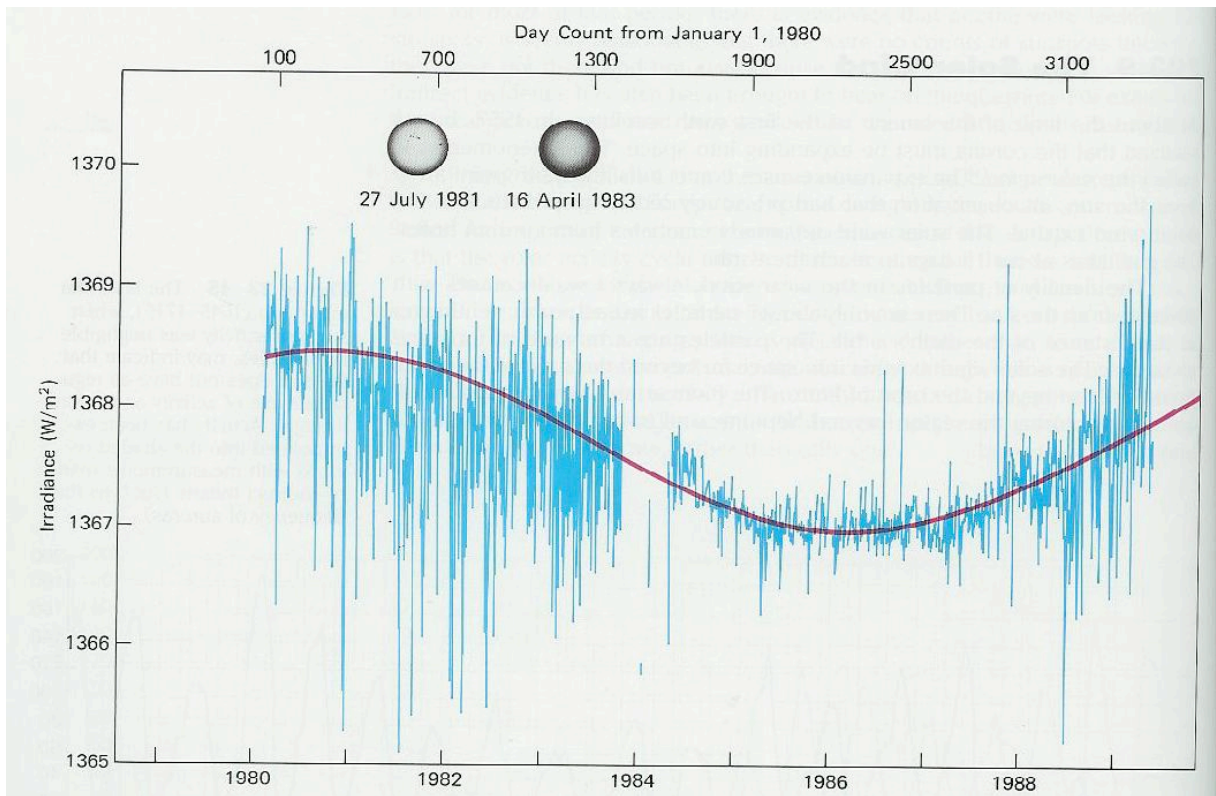
$$G = 6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

Calculer la masse du Soleil

$$M = 1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

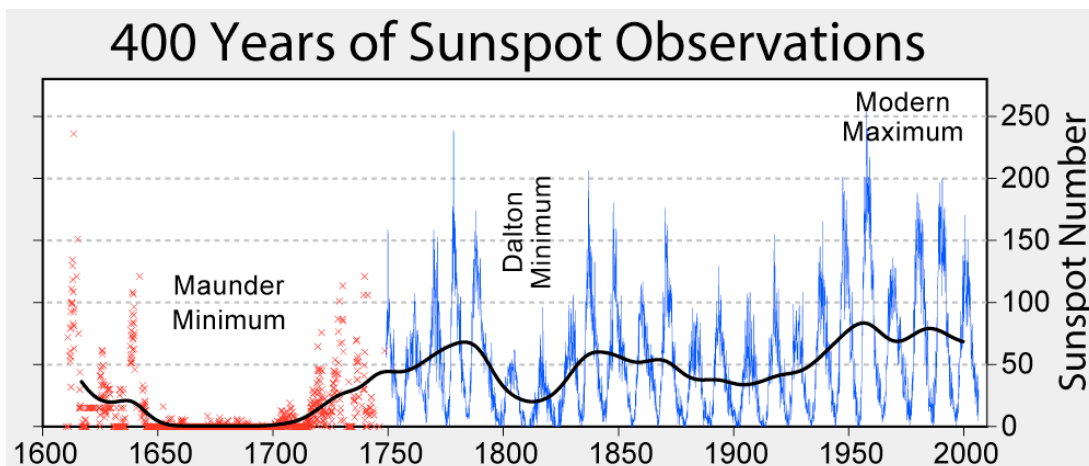


## 2. C. Constante solaire



Crédit: Astronomy, From the Earth to the Universe, J.M. Pasachoff, Saunders College Publishing, 1993 (4e édition)

La « constante solaire », ou irradiance ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), est la puissance lumineuse solaire recueillie par unité de surface par un bolomètre/calorimètre (dans toutes les longueurs d'onde) au sommet de l'atmosphère terrestre (voir Ciel et Terre, 117, p.114, 2001). Elle vaut actuellement  $1368.5 \text{ W}/\text{m}^2$ . Elle varie légèrement d'un jour à l'autre sous l'effet des taches solaires. Elle peut varier sur de plus longues périodes (siècles ou millénaires) suite à de légères fluctuations de structure interne du Soleil. Ex : le « petit âge glaciaire » ou « minimum de Maunder » (voir par exemple [http://en.wikipedia.org/wiki/Little\\_Ice\\_Age](http://en.wikipedia.org/wiki/Little_Ice_Age)).

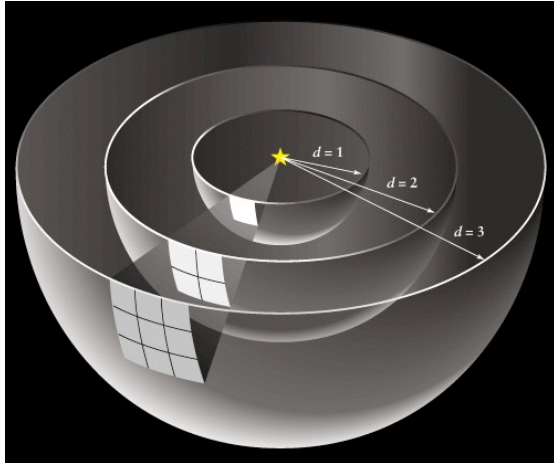




*Les chasseurs dans la neige* (1565),  
 Pierre Bruegel l'Ancien (1525-1569),  
 Kunsthistorisches Museum Wien,  
 Vienne

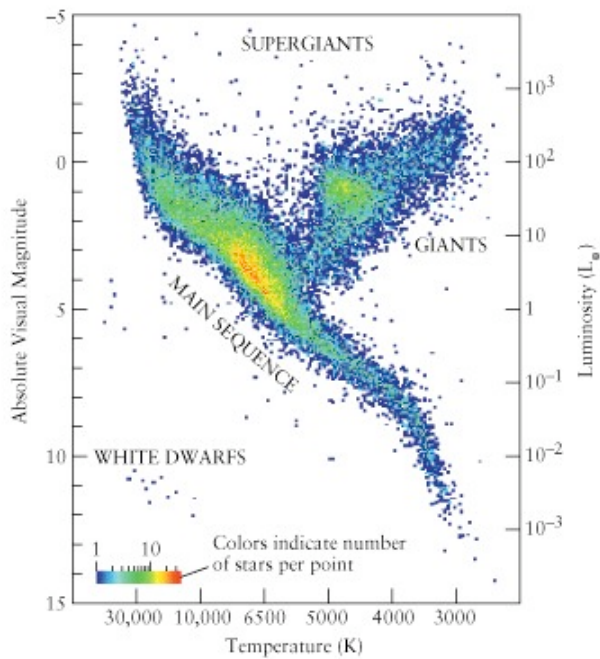
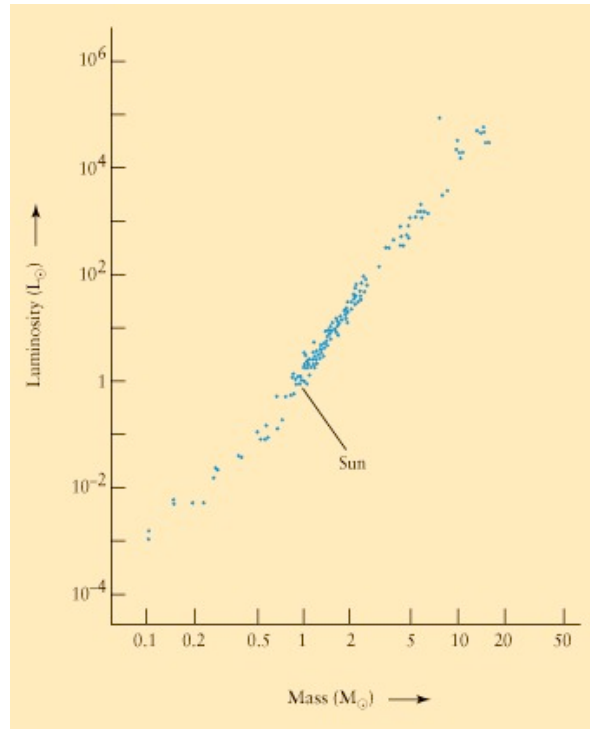
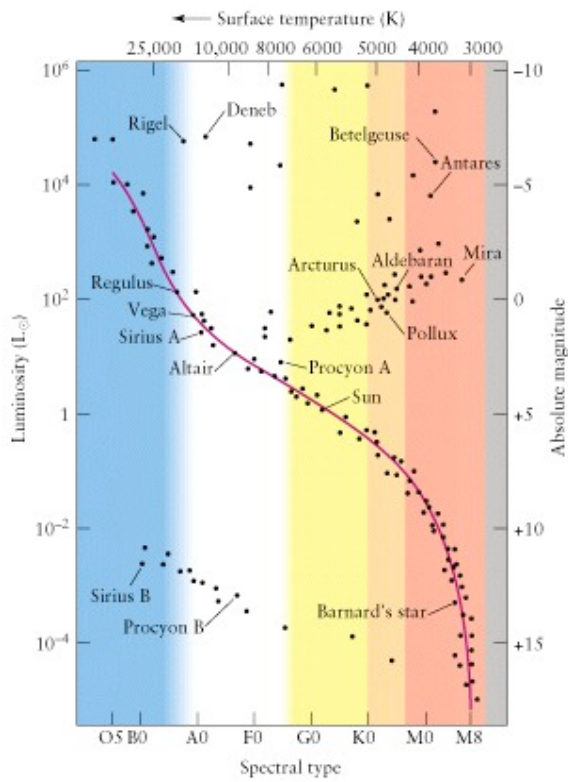
Calculer la puissance lumineuse totale du Soleil.

$$L = 1368.5 \times 4\pi \times UA^2 = 1368.5 \times 4\pi \times (149.597\,870\,10^9)^2 = 3.84 \cdot 10^{26} \text{ W}$$



Crédit : Discovering the universe (5th edition), N.F. Comins, W.J. Kaufmann III, Freeman and Co., New York, 1999

## 2. D. Le Soleil est une étoile banale



Crédit : Discovering the universe (5th edition), N.F. Comins, W.J. Kaufmann III, Freeman and Co., New York, 1999



### 3. Quelles sont les sources d'énergie capables de maintenir une telle production d'énergie sur plusieurs milliards d'années ?

Luminosité du Soleil:  $L = 3.9 \cdot 10^{26} \text{ J s}^{-1}$  ( $\equiv W$ )

Masse du Soleil:  $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

→ contenu énergétique:  $L/M = 2 \cdot 10^{-4} \text{ J s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$

Combien de temps le Soleil peut-il maintenir une telle production d'énergie?

#### 1. Par des réactions chimiques:

ex. rendement calorifique du charbon:  $R = 30\,000 \text{ kJ/kg}$

→  $L/M = R / \Delta t \rightarrow \Delta t = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ s} = 5\,000 \text{ ans !}$

**" Si le soleil était composé de charbon de terre massif brûlant dans l'oxygène pur, il ne pourrait brûler pendant plus de six mille ans sans être entièrement consumé: il serait donc éteint depuis l'origine des temps historiques "**

**Camille Flammarion, Astronomie Populaire (1879)**

#### 2. Par des réactions nucléaires :

$E = m c^2$  (Einstein 1905) →  $R \equiv E/m = c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}$

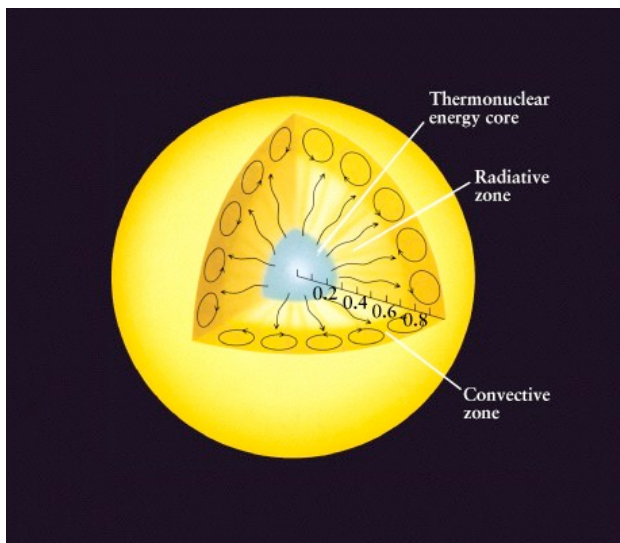
→  $L/M = R / \Delta t \rightarrow \Delta t = 4.5 \cdot 10^{20} \text{ s} = 15 \text{ mille milliards d'années !}$

Comment convertir masse en énergie ??

Par des réactions nucléaires (Eddington 1920)

En pratique :  $R = 6.17 \cdot 10^{14} \text{ J/kg}$  (transformation de 4  $^1\text{H}$  en  $^4\text{He}$ )

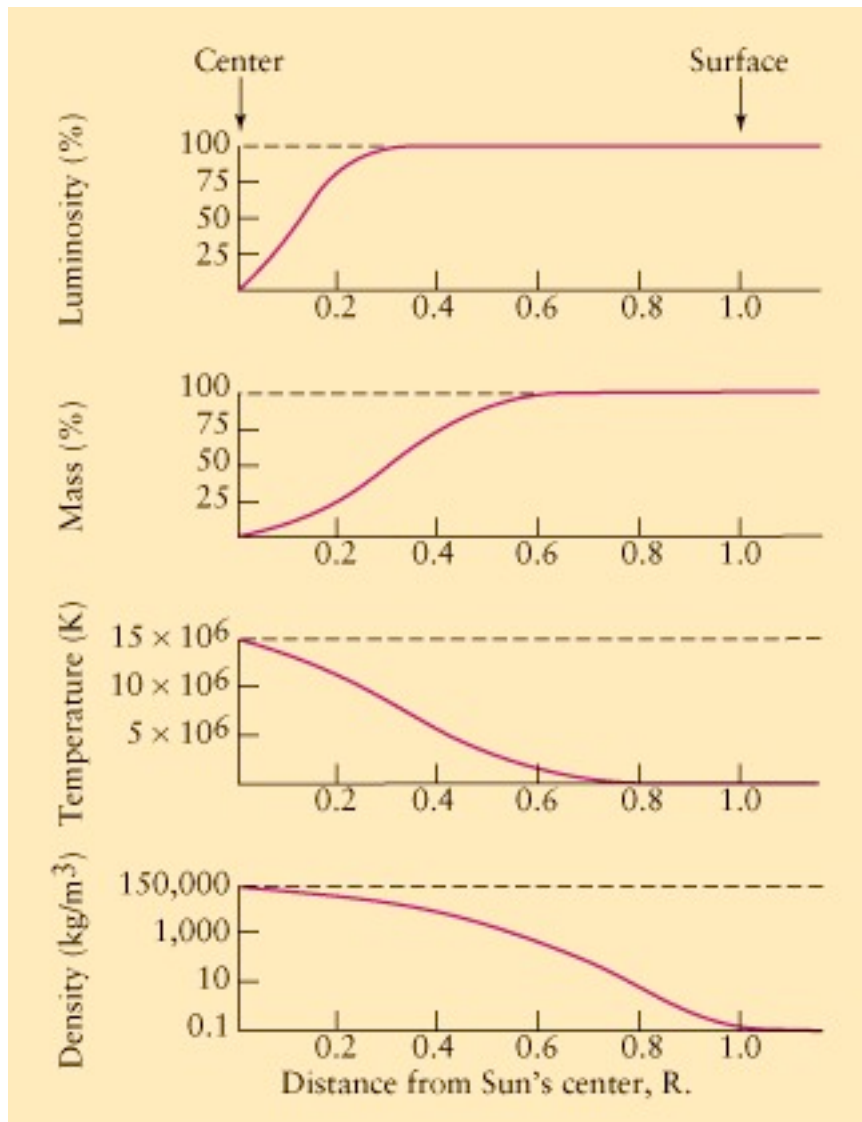
Quelle est la durée de vie du Soleil, sachant que seule 10% de sa masse participe aux réactions de fusion thermonucléaire ?



→  $L / 0.1 M = R / \Delta t$

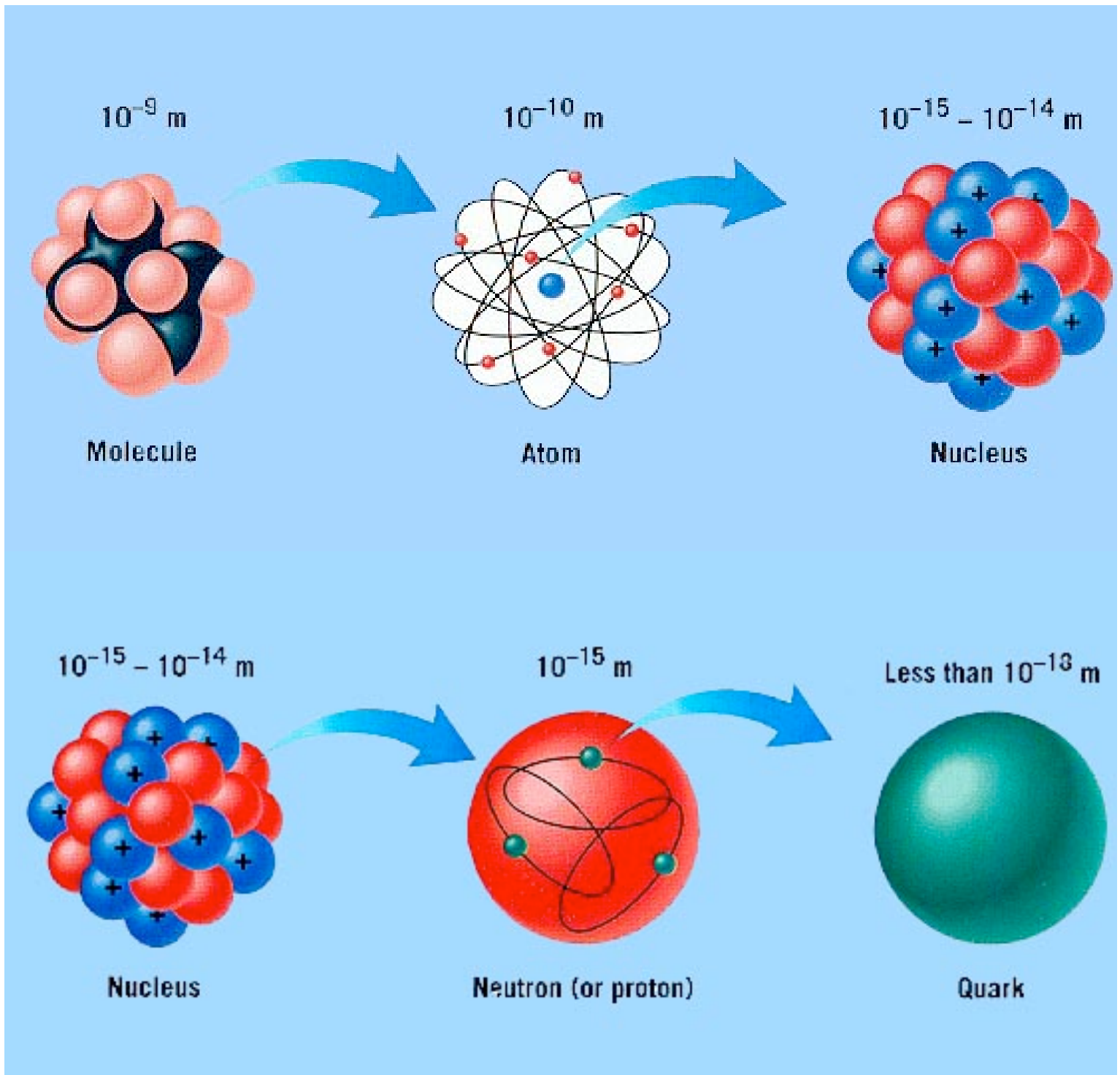
→  $\Delta t = 3 \cdot 10^{17} \text{ s} = 10 \text{ milliards d'années !}$

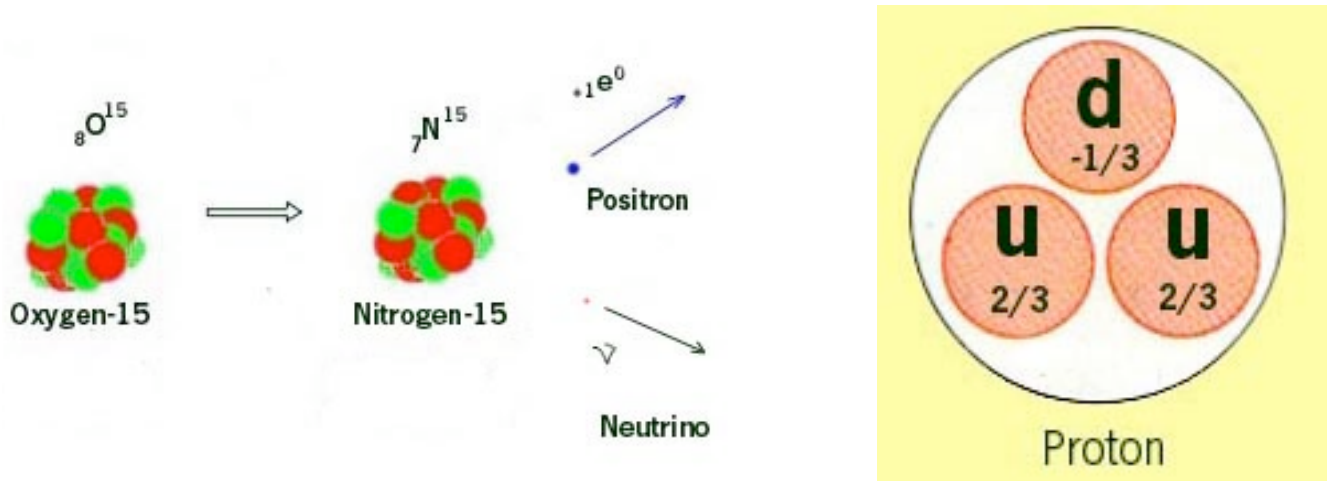
Crédit : Discovering the universe (5th edition), N.F. Comins, W.J. Kaufmann III, Freeman and Co., New York, 1999



Crédit : Discovering the universe (5th edition), N.F. Comins, W.J. Kaufmann III, Freeman and Co., New York, 1999

#### 4. La structure de la matière et l'énergie nucléaire





LEPTONS		QUARKS	
electron $e^-$	electron neutrino $\nu_e$	up $u$	down $d$
charge -1	charge 0	charge $+2/3$	charge $-1/3$

### Comment calculer $R = dE / dm$ ?

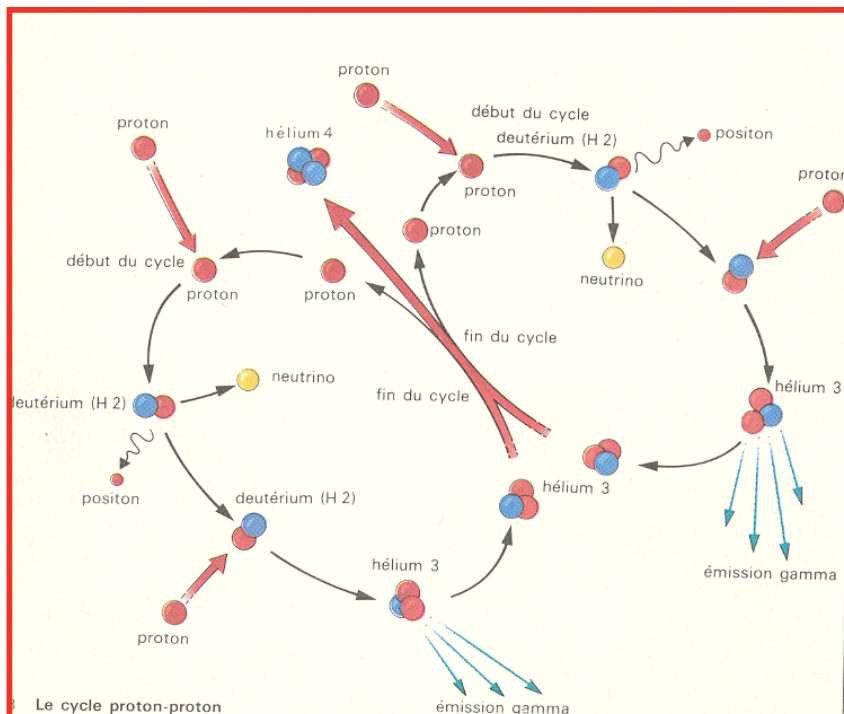
Masse du noyau  ${}^1\text{H}$  = masse du proton  $\equiv m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27}$  kg  
 1 unité de masse atomique  $\equiv 1/12$  masse atome  ${}^{12}\text{C} \equiv \text{u.m.a.} = 1.66054 \cdot 10^{-27}$  kg

→ Masse du noyau  ${}^1\text{H} = 1.007$  u.m.a.  $\approx 1 m_p$   
 Masse du noyau  ${}^4\text{He} = 4.001$  u.m.a.  $\approx 3.9726 m_p$

Remarque :

Ces valeurs de masse nucléaire sont légèrement différentes des masses atomiques mentionnées dans les tableaux de Mendeleev, car ces dernières incluent la masse des électrons (moins leur énergie de liaison) :  
 $m_e / m_p = 5.45 \cdot 10^{-4} \rightarrow 2 m_e / m_p = 0.0011$

### Le cycle proton-proton de combustion de l'hydrogène dans le Soleil



Quelle est la masse perdue lorsque 4 protons se transforment en 1 noyau de  ${}^4\text{He}$ ?

La transformation de 4  ${}^1\text{H}$  en  ${}^4\text{He}$  correspond à un défaut de masse de  $(4 - 3.9726) m_p = 0.0274 m_p$ , transformé en énergie.

Pourquoi y a-t-il un défaut de masse?

Le noyau de  ${}^4\text{He}$  est une structure stable : les 2 protons et 2 neutrons qui le constituent sont liés. Pour casser le noyau de  ${}^4\text{He}$ , il faut fournir de l'énergie. A l'inverse, lorsque ce noyau se forme, de l'énergie (« de liaison ») est libérée. Cette énergie est prise « sur le compte » de la masse disponible initialement, en vertu de l'équivalence masse-énergie établie par l'équation d'Einstein  $E = m c^2$ .

On peut donc dire que le défaut de masse correspond à l'énergie de liaison des nucléons dans un noyau.

Quelle est l'énergie libérée par réaction ?

$$0.0274 m_p c^2 = 0.0274 \times 1.6726 \cdot 10^{-27} \times (300\,000\,000)^2 = 4.124 \cdot 10^{-12} \text{ J par réaction}$$

Quelle est l'énergie libérée par la transformation d'un kilogramme d'hydrogène?

La combustion de chaque kilogramme d'hydrogène s'accompagne donc de la libération de  $c^2 \cdot 0.0274 / 4 = 6.17 \cdot 10^{14} \text{ J/kg}$

ou encore  $4.124 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  pour la combustion de 4 noyaux d'hydrogène pesant  $4 \times 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , soit  $4.124 \cdot 10^{-12} / 4 / 1.6726 \cdot 10^{-27} = 6.17 \cdot 10^{14} \text{ J/kg}$ .

Combien de tonnes d'hydrogène sont-elles brûlées chaque seconde dans le Soleil?

$dM = L/R = 3.84 \cdot 10^{26} \text{ J/s} / 6.17 \cdot 10^{14} \text{ J/kg} = 6.22 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}$  soit 622 millions de tonnes d'hydrogène brûlées chaque seconde !

## 5. Que se passe-t-il lorsque l'hydrogène central est épuisé?

On peut généraliser le concept de défaut de masse à n'importe quelle réaction.

La masse d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses de ses constituants:

$$\text{Défaut de masse} = (Z m_p + N m_n) - m_{\text{noyau}} > 0$$

(Rappel: noyau = A nucléons dont Z protons et N neutrons,  $A = Z + N$ )

De manière analogue, la masse par nucléon du noyau =  $m_{\text{noyau}} / A < 1$

Cette masse manquante lors de la formation du noyau à partir de ses constituants (neutrons et protons) est libérée sous forme d'énergie:

$$\text{Energie de liaison du noyau} = c^2 [(Z m_p + N m_n) - m_{\text{noyau}}]$$

C'est aussi l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le briser en ses constituants (neutrons et protons).

Energie libérée par la fusion de 2 noyaux identiques:

$$\begin{aligned} E &= (2 m_{\text{noyau-cible}} - m_{\text{noyau-fille}}) c^2 \\ &= [2 \mathcal{M}_{\text{noyau-cible}} A - \mathcal{M}_{\text{noyau-fille}} (2A)] c^2 \quad \text{où } \mathcal{M} \text{ est la masse par nucléon} \\ &= [\mathcal{M}_{\text{noyau-cible}} - \mathcal{M}_{\text{noyau-fille}}] 2A c^2 \end{aligned}$$

→ Signe de E = signe de  $[\mathcal{M}_{\text{noyau-cible}} - \mathcal{M}_{\text{noyau-fille}}]$

**E > 0 (réaction exothermique) :**

