



## La source d'énergie des étoiles

A. Jorissen

Institut d'Astronomie et d'Astrophysique

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

### Fascicule de l'élève

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.

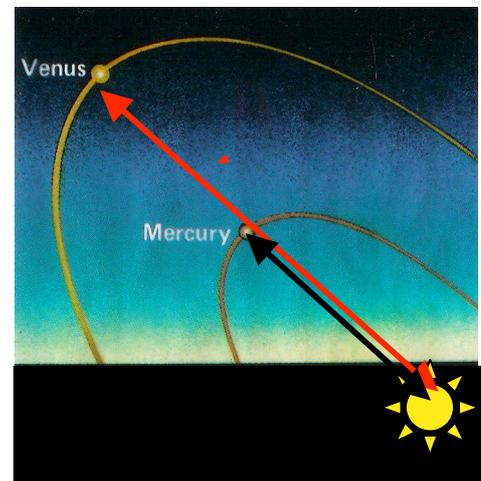
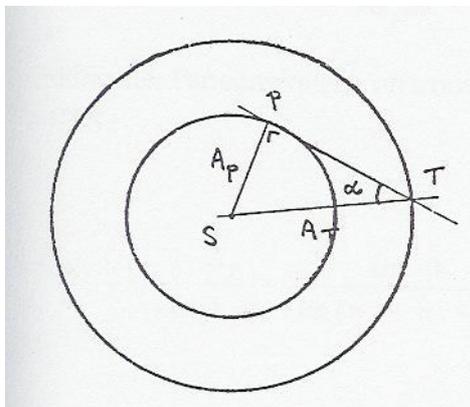
## 2. Evaluer à partir de quantités accessibles par l'observation le taux de production d'énergie dans le Soleil (= sa luminosité)

### 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



##### 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	..
Mercur	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.

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

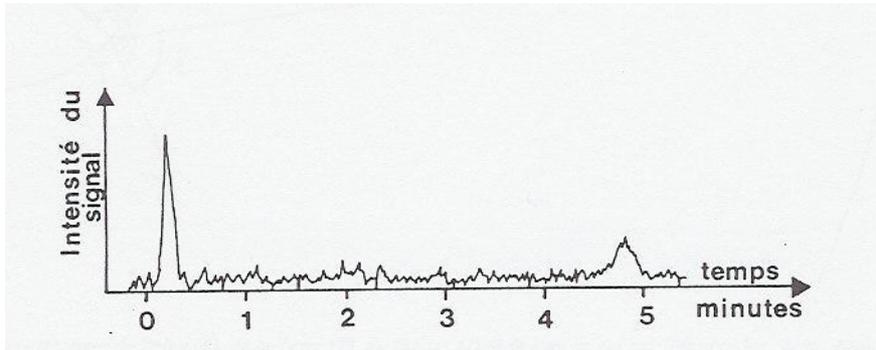


Figure 1. Echo renvoyé par Venus d'un signal radar envoyé depuis la Terre. La durée écoulée entre le signal et l'écho est de 275.9 secondes, soit 4.6 minutes.

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

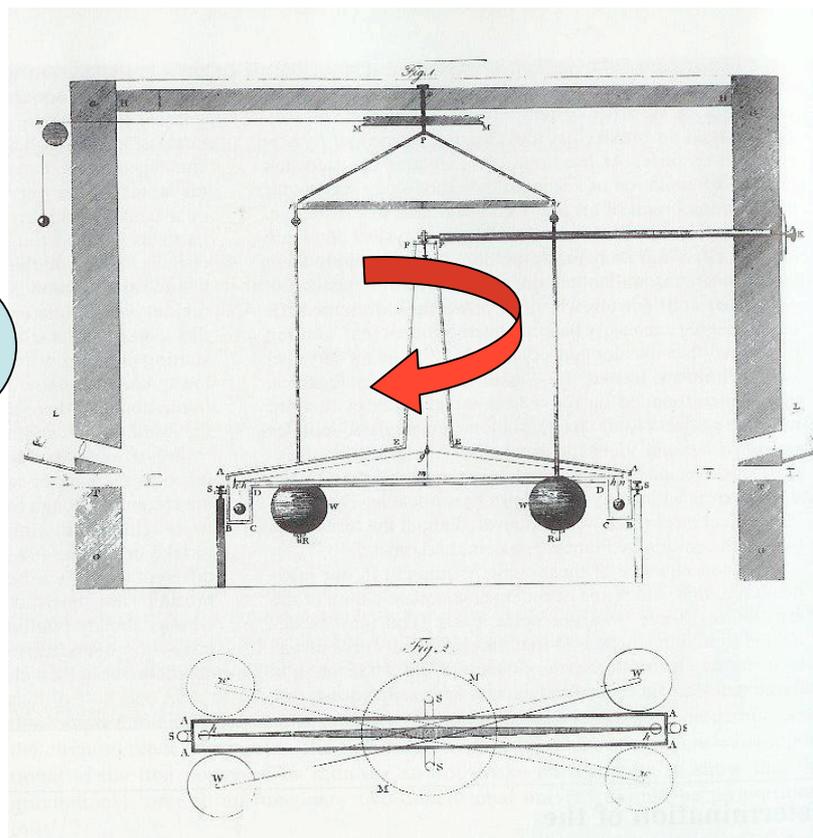
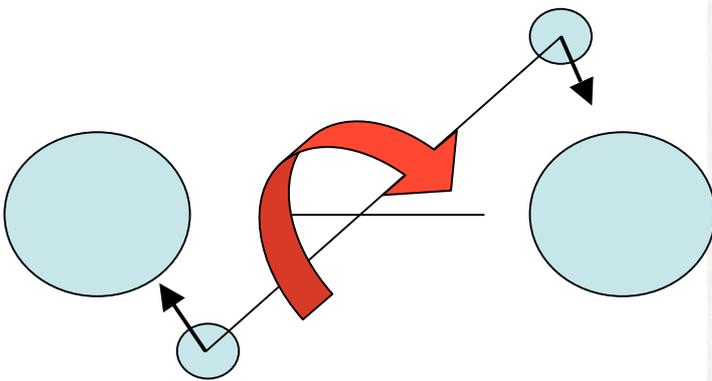
## 2.B. Masse du Soleil

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.

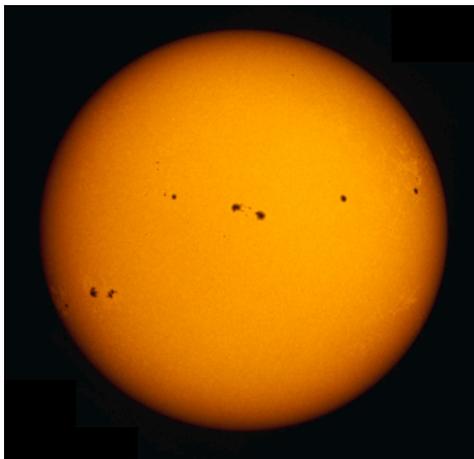
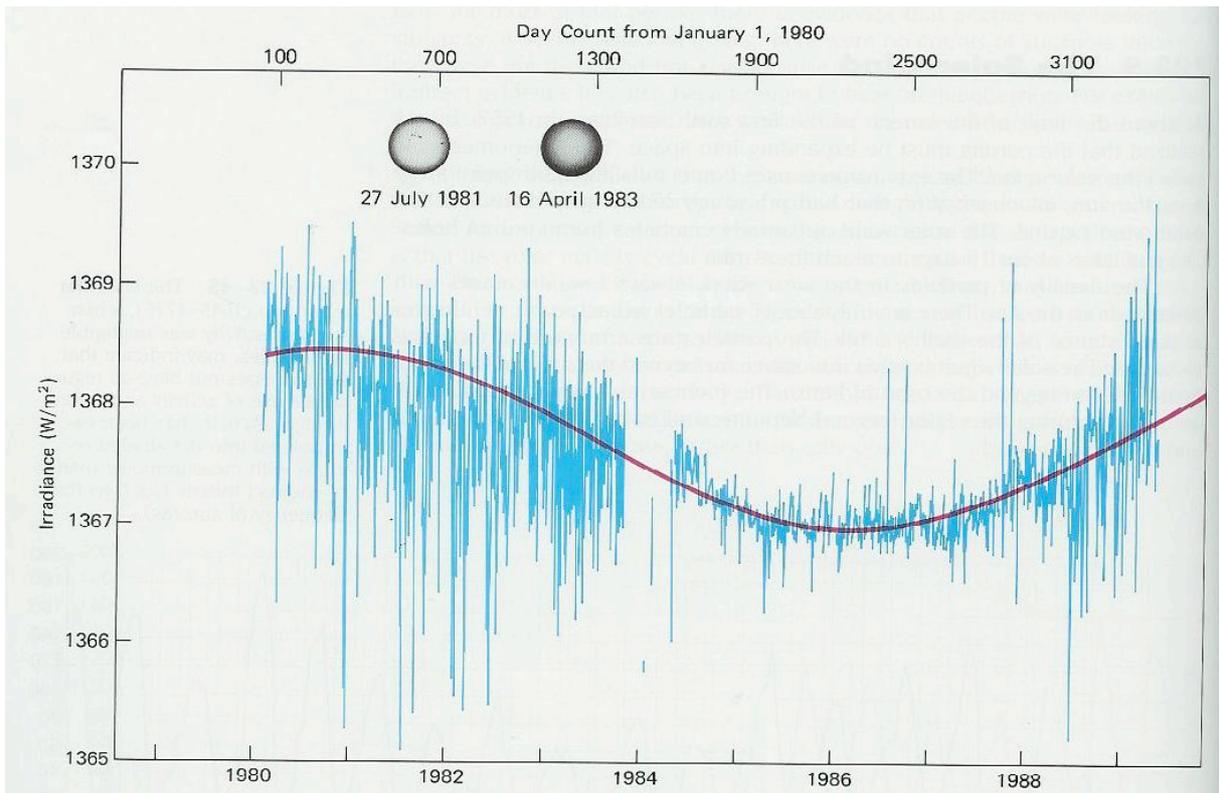
Mesure de la constante de la gravitation  $G$  par Henry Cavendish (1731 - 1810) au moyen d'un pendule de torsion :

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

Calculer la masse du Soleil

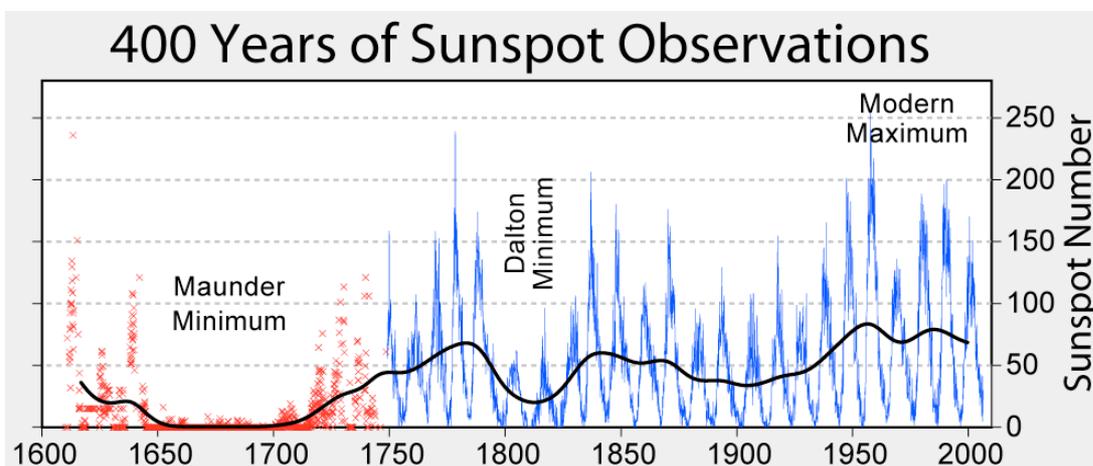


## 2. C. Constante solaire



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

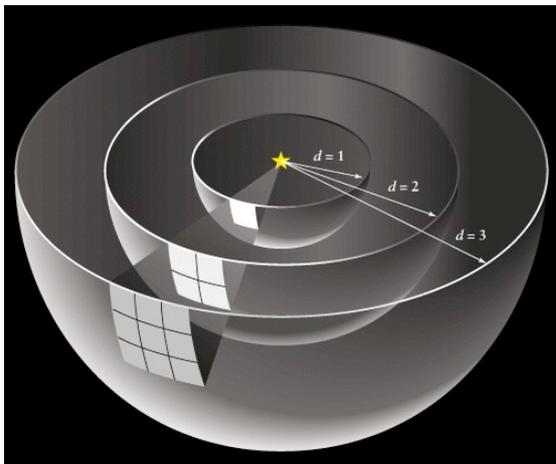
La « constante solaire », ou irradiance ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), est la puissance lumineuse solaire recueillie par unité de surface par un bolomètre/calorimètre (dans toutes les longueurs d'onde) au sommet de l'atmosphère terrestre (voir Ciel et Terre, 117, p.114, 2001). Elle vaut actuellement  $1368.5 \text{ W}/\text{m}^2$ . 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)).





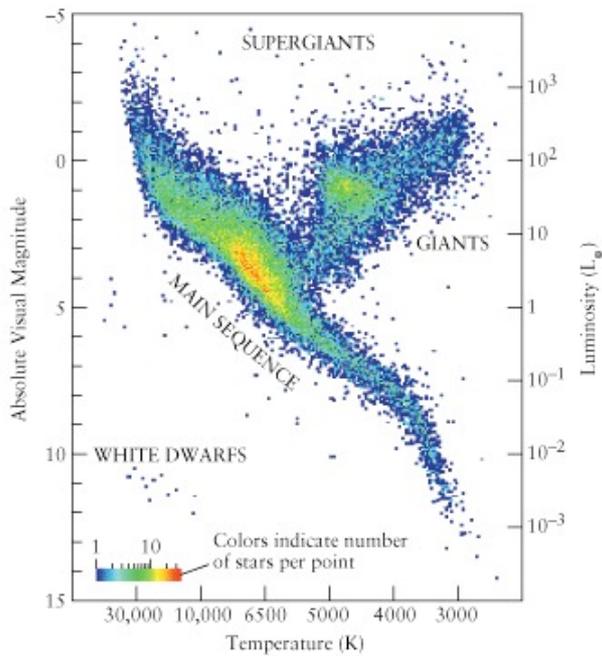
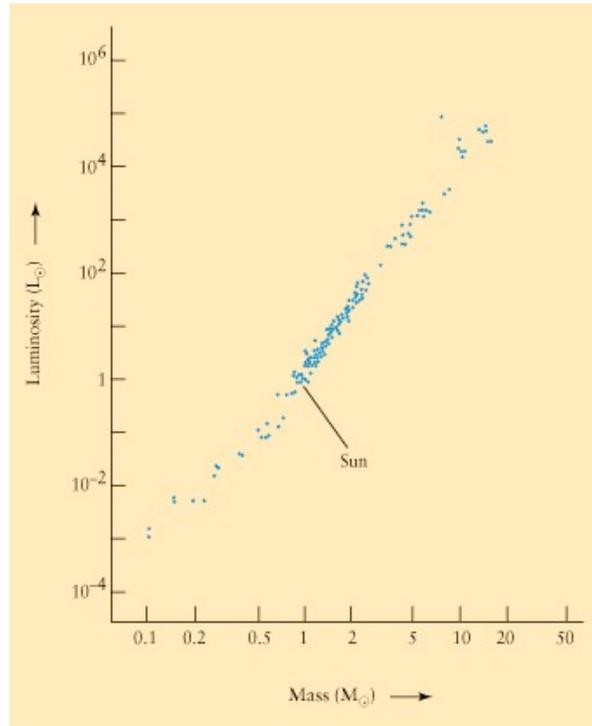
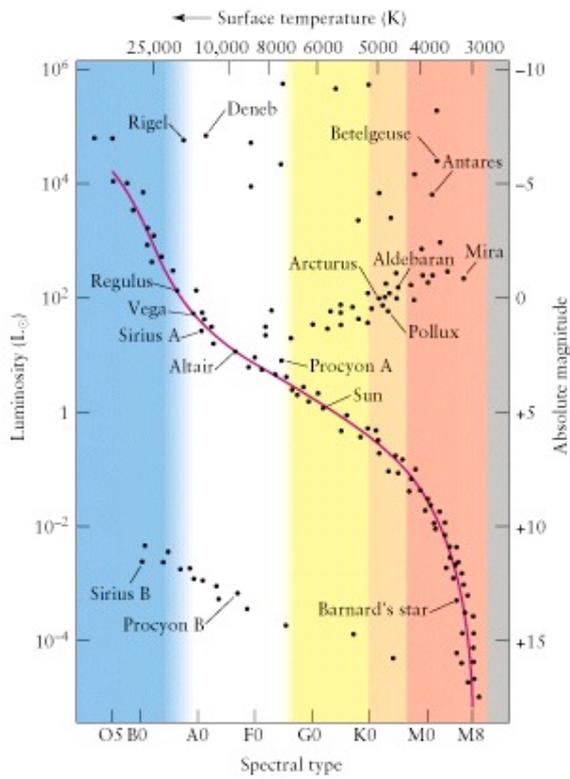
*Les chasseurs dans la neige* (1565),  
Pierre Bruegel l'Ancien (1525-1569),  
Kunsthistorisches Museum Wien,  
Vienne

**Calculer la puissance lumineuse totale du Soleil.**



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:  $R = 30\,000 \text{ kJ/kg}$

2. **Par des réactions nucléaires :**

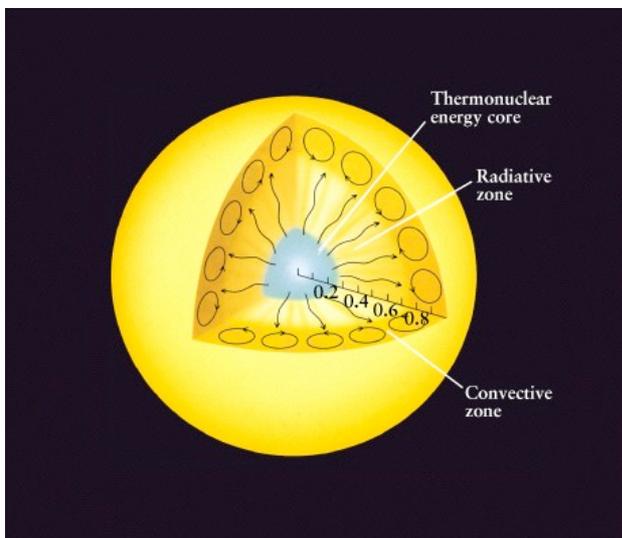
$E = m c^2$  (Einstein 1905) →  $R = E/m = c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}$

Comment convertir masse en énergie ??

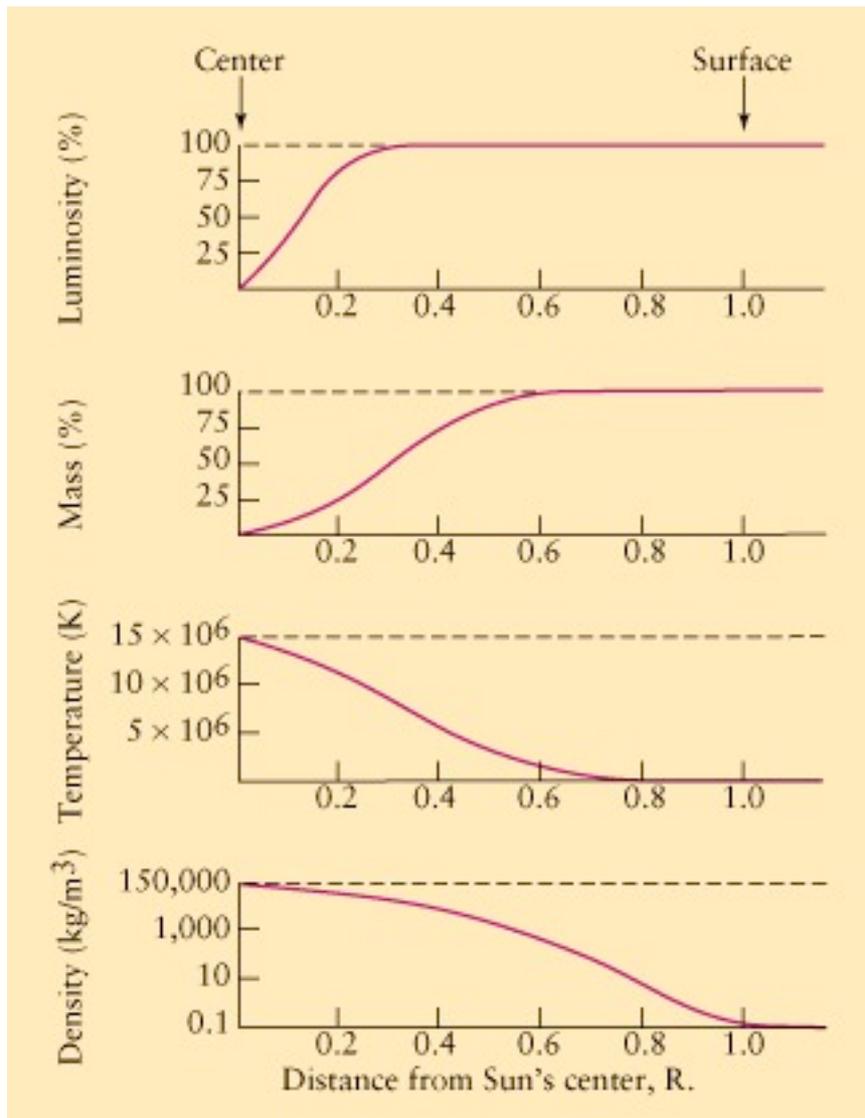
Par des réactions nucléaires (Eddington 1920)

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 ?

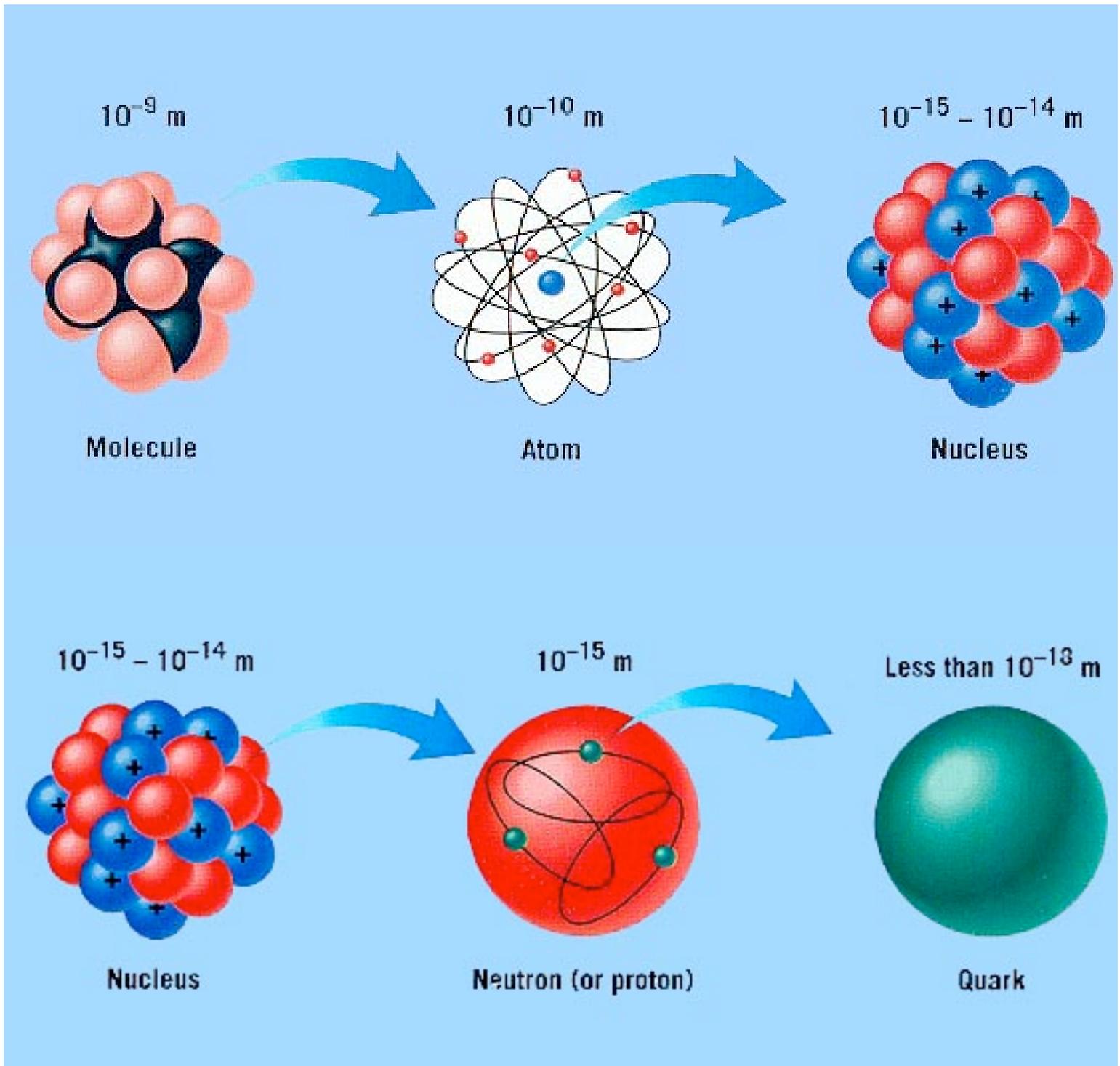


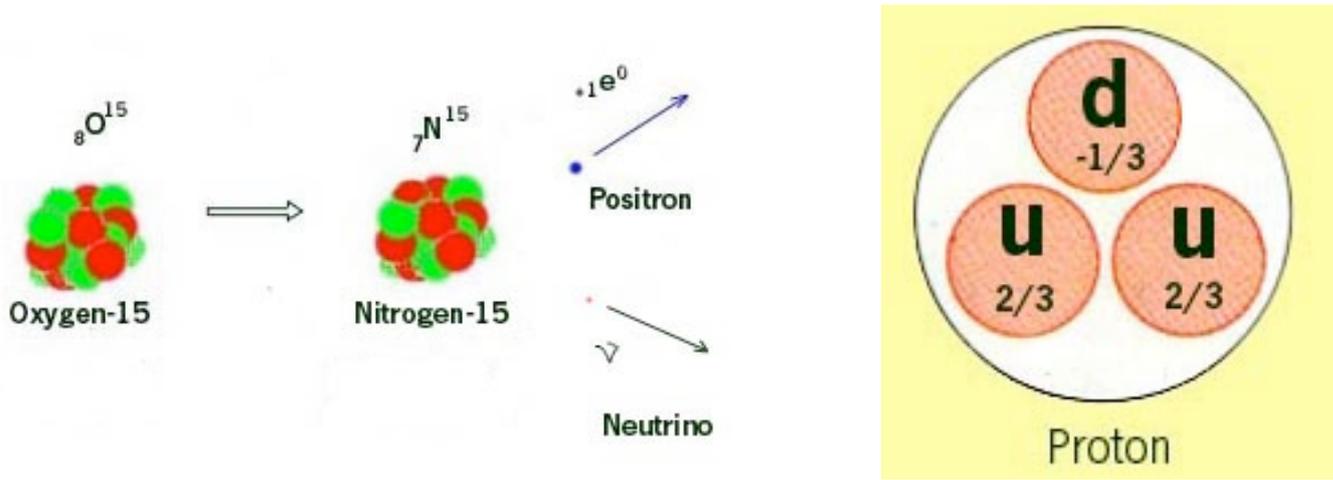
Crédit : Discovering the universe (5th edition), N.F. Comins, W.J. Kaufmann III, Freeman and Co., New York, 1999



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 $R = dE / dm$ ?

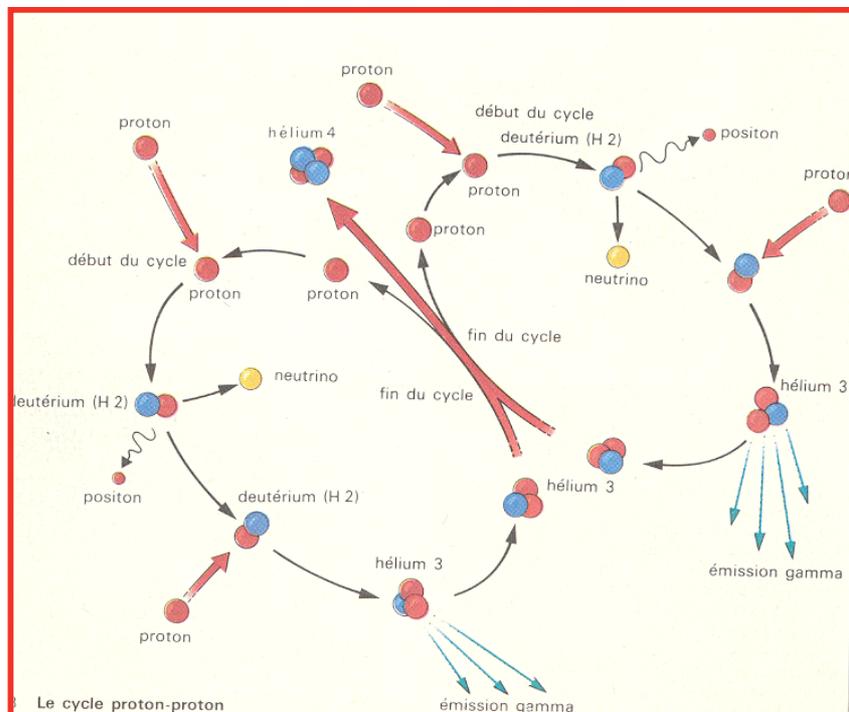
Masse du noyau  ${}^1\text{H}$  = masse du proton  $\equiv m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27}$  kg  
 1 unité de masse atomique  $\equiv 1/12$  masse atome  ${}^{12}\text{C} \equiv \text{u.m.a.} = 1.66054 \cdot 10^{-27}$  kg

→ 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  ${}^4\text{He}$ ?

Pourquoi y a-t-il un défaut de masse?

Quelle est l'énergie libérée par réaction ?

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

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

## 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) :**

