

Le Soleil, notre étoile

[D'après le site « Astronomie et mécanique céleste » de l'UFE de l'observatoire de Paris et le site du LESIA](#)

Introduction

Le Soleil est une étoile, mais c'est aussi notre étoile, beaucoup plus proche de nous que les autres étoiles. Du fait de cette proximité, le Soleil nous fournit de nombreuses informations sur son fonctionnement. On peut le définir en deux lignes, comme n'importe quelle étoile, ou alors entrer dans le détail d'une physique qui se complexifie chaque jour : à chaque fois qu'une question est résolue, elle en soulève une nouvelle. Dans cette fiche, nous en resterons aux généralités. Une autre fiche traite de l'activité du Soleil et des relations entre cette activité solaire et la Terre. Une autre traite du rayonnement solaire intercepté par la Terre. Une autre encore traite de la naissance du Soleil (et du système solaire).

Composition

La matière du Soleil est à l'état de **plasma** : c'est un gaz fortement ionisé, constitué d'électrons, de protons et d'atomes et molécules plus ou moins ionisés. Le Soleil est constitué d'hydrogène à 95%, l'hélium représentant un peu moins de 5%. De nombreux autres éléments sont été détectés dans l'atmosphère de l'étoile, mais en très faibles proportions, les plus abondants étant l'oxygène, le carbone et l'azote.

Le Soleil en chiffres

- **Age : 4,5 milliards d'années**
- **Durée de vie estimée : 10 milliards d'années**
- **Distance à la Terre : 150 millions de km**
- Rayon : 0,7 million de km (Terre : 6 300 km)
- Masse : $2 \cdot 10^{30}$ kg (Terre = $6 \cdot 10^{24}$ kg)
- Densité : 1,4 (Terre : 5,5)
- Puissance rayonnée : $4 \cdot 10^{26}$ W
- Energie reçue par la Terre : $1353 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- Température du cœur du Soleil : 15 millions de K
- **Température de surface : 5 800 K**

Apprenez ce qui est en gras. Pour le reste, vous pouvez éventuellement retenir quelques ordres de grandeur. Pour bien prendre la mesure de notre étoile :

- on pourrait faire entrer 1,4 million de fois la Terre dans le volume du Soleil
- l'énergie rayonnée par le Soleil en une seconde correspond à l'énergie que produirait le parc nucléaire français pendant 30 000 ans (en prenant la valeur 2011 et en supposant que nos centrales durent si longtemps...)

Pourquoi le Soleil brille-t-il ? ([en détail sur le site de l'observatoire](#))

Le Soleil est la seule **source primaire de lumière** dans le système solaire : les autres objets (planètes, satellites, comètes...) brillent dans le ciel nocturne parce qu'ils diffusent la lumière solaire qu'ils reçoivent (programme de 5^e !). Le Soleil brille car sa « surface » est composée de gaz ionisé très chaud - 5 800 K - qui émet de la lumière. Certes, c'est chaud (le point le plus chaud d'une flamme est à 1 700 K, et le corps naturel le plus chaud que l'on peut rencontrer à la surface de la terre est la lave, à environ 1000 K), mais c'est bien peu par rapport aux températures des zones internes du Soleil !

En effet, **pour que le Soleil soit à l'équilibre et résiste aux forces de gravité** en ne s'effondrant pas sur lui-même, on calcule, connaissant la masse de l'étoile, qu'**il règne une pression et une température colossales en son cœur : plusieurs centaines de milliards d'atmosphères et environ 15 millions de degrés**. Dans ces conditions, les couches internes de l'étoile peuvent contrebalancer le poids énorme des couches supérieures et l'étoile ne se contracte pas ([WT 2009](#)).

Mais comment une telle température est-elle atteinte ? Où le Soleil puise-t-il son énergie ? On peut faire différentes hypothèses mais toute hypothèse, pour ne pas être infirmée, doit rendre compte d'un fait : notre étoile brille depuis 4,6 milliards d'années, l'âge du système solaire.

- La chaleur du Soleil pourrait provenir simplement de la contraction gravitationnelle de la matière qui le forme. Un calcul simple montre que le Soleil, avec cette source d'énergie, ne dépasserait pas 25 millions d'années. Tout ce que ce mécanisme peut expliquer, c'est comment le jeune Soleil a pu chauffer.
- Supposons que la source d'énergie du Soleil soit de nature chimique, comme par exemple une combustion. Connaissant la masse du Soleil et la puissance maximale développée par une réaction chimique, on calcule que le Soleil ne pourrait briller plus de 70 000 ans. Ce mécanisme est donc exclu.
- On exclut de même une source d'énergie par désintégration radioactive. La seule source d'énergie connue qui puisse expliquer la longévité du Soleil est la **fusion nucléaire**. C'est le fait de transformer un élément léger en un élément plus lourd avec diminution de la masse totale, l'énergie libérée étant proportionnelle à la différence de masse selon la célèbre formule établie par Einstein : $E = mc^2$. Dans le cas du Soleil, la réaction principale, qui se déroule dans le **cœur** de l'étoile, est une **chaîne de réactions de fusion où 4 noyaux d'hydrogène donnent un noyau d'hélium** ([WT 2009](#)).

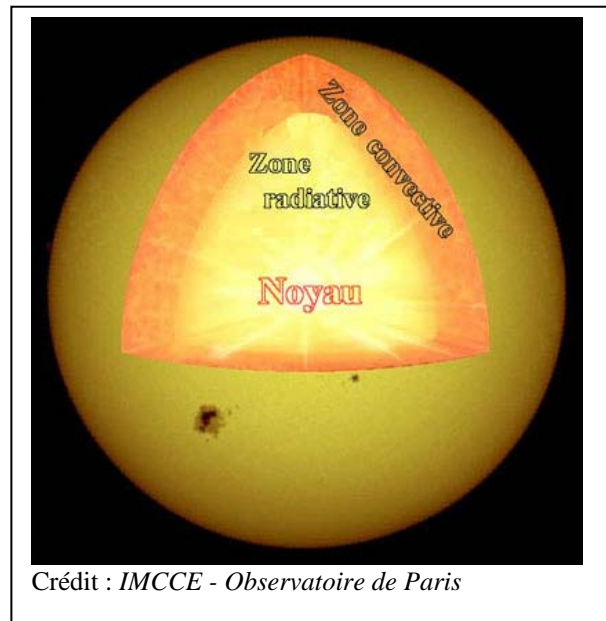
La structure du Soleil ([en détail sur le site de l'observatoire](#))

a) Le cœur ou noyau

Ces réactions de fusion dépendent de la densité (égale à 150 au centre de l'étoile : un centimètre cube de matière solaire a une masse de 150 g !), qui doit être assez élevée pour assurer la rencontre des noyaux, et de la température (expression de l'énergie cinétique des noyaux), qui doit être assez importante pour vaincre la force de répulsion électrostatique lors d'une collision. La zone où ces conditions de la fusion sont réunies est le cœur ou noyau. La majeure partie de l'énergie produite est libérée sous forme de photons très énergétiques.

b) La zone radiative

Chaque photon est presque immédiatement absorbé par un autre atome qui émet à son tour un autre photon de moindre énergie, et ainsi de suite. Dans la zone radiative, qui entoure le cœur, la fusion n'a plus lieu, mais l'énergie libérée dans le cœur est progressivement transférée vers la surface sous forme de photons. Constamment réabsorbés, les photons mettent plus d'un million d'années à atteindre la « surface » de l'étoile, d'où ils partent vers le milieu interstellaire (voir plus loin) ; ils sont alors peu énergétiques, dans le domaine de l'UV, du visible et de l'infrarouge, alors que les photons émis dans le cœur sont des rayons gamma. Notez que cette « fuite » des photons vers la surface engendre une « pression de radiation » qui contribue à lutter contre l'effondrement gravitationnel.



Crédit : IMCCE - Observatoire de Paris

c) La zone convective

A mesure qu'on s'éloigne du cœur vers la surface, la densité, la pression et la température décroissent. Près de la surface, l'énergie n'est plus transportée par rayonnement mais par convection : le rayonnement chauffe la matière qui monte, se refroidit à proximité de la surface et s'enfonce pour se réchauffer de nouveau. C'est la zone convective. La signature de cette convection est visible au niveau de la photosphère sous la forme de granulations.

Quizz

On vient de voir que deux forces agissent globalement sur le Soleil (et sur toute autre étoile) : la gravité, qui a tendance à faire s'effondrer l'étoile sur elle-même ; et la pression qui tend au contraire à dilater l'étoile. On a vu en outre que les réactions de fusion dépendent de la température et de la densité. Expliquez comment le Soleil est à l'équilibre.

Imaginons que le Soleil se dilate sous l'effet de la pression. Sa densité va diminuer, et le taux des réactions nucléaires va également diminuer. Moins d'énergie étant produite, la température va baisser. La densité et la température diminuant, la pression va également diminuer, et la gravité fera se contracter le Soleil qui reviendra à sa taille de départ. À l'inverse, si le Soleil se contractait, la densité augmenterait, ce qui ferait croître la production d'énergie par fusion, donc la température et la pression : le Soleil se dilaterait en retour.

d) L'atmosphère solaire

La « surface » du Soleil (notion malaisée pour une boule de gaz !) est définie comme la couche à partir de laquelle la lumière visible s'échappe et nous parvient. Cette couche est nommée **photosphère**. C'est elle qui délimite si nettement le disque du Soleil dans le ciel (*ne jamais le regarder sans protection !*). Mais le Soleil ne s'arrête pas là. Au-delà s'étend la **chromosphère**, visible lors des éclipses totales de Soleil comme un fin liseré coloré en rouge (d'où son nom). C'est le siège des protubérances solaires. Puis, sur près de trois rayons solaires, s'étend la **couronne**. Masquée par la luminosité de la photosphère, elle est également révélée lors des éclipses. En fait, la couronne n'a pas vraiment de limite supérieure car le **vent solaire** (le flux de matière émis continuellement par le Soleil, voir la fiche « Activité solaire ») s'étend jusque dans le milieu interplanétaire. La couronne est un milieu très peu dense. La température y atteint quelques millions de Kelvin. C'est le siège de violentes éruptions, qui ont des effets jusque sur Terre (voir la fiche « Activité solaire »).

Eclipse de Soleil

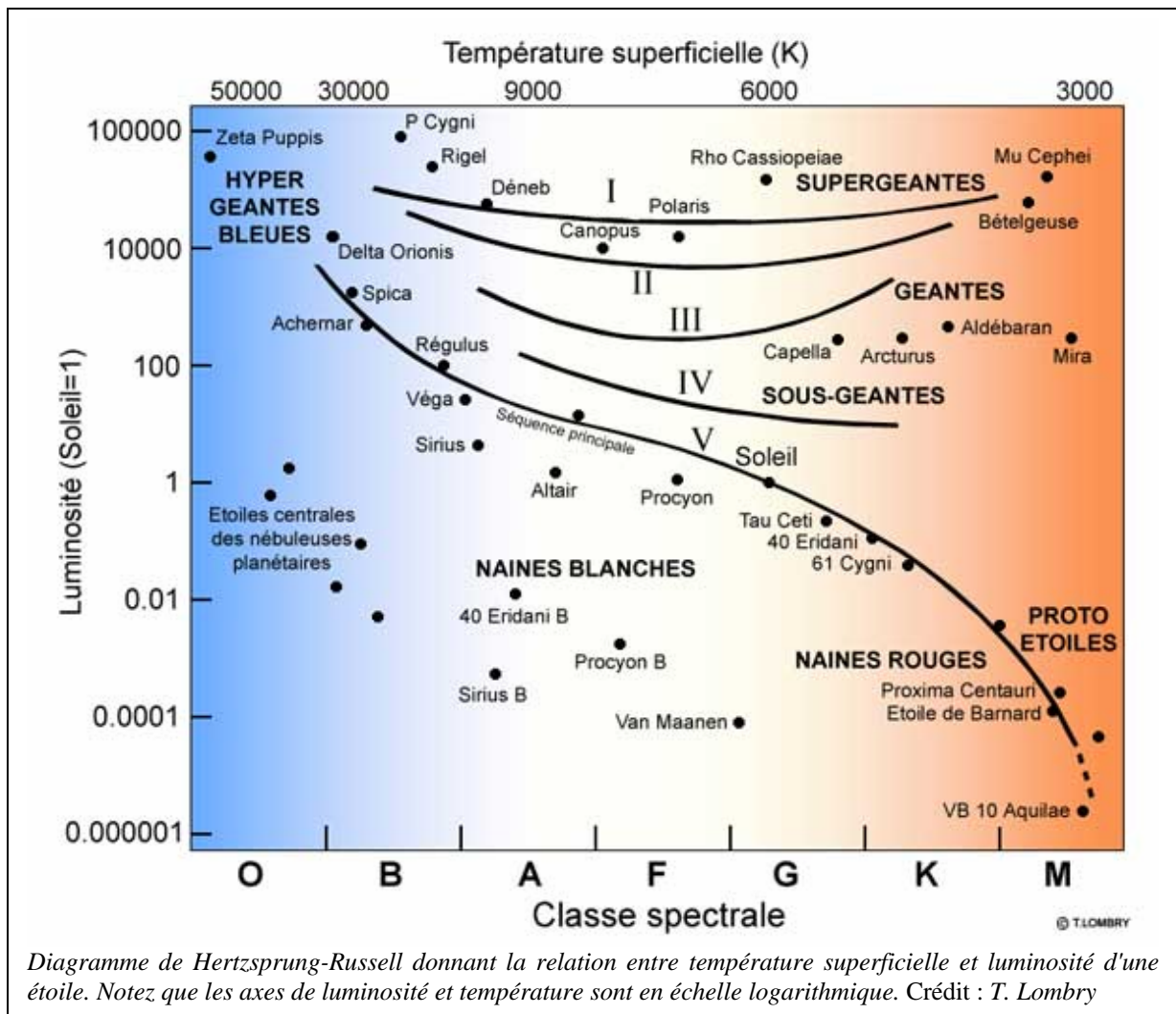


Première et dernière photos : la photosphère (jaune) est encore visible ; seconde, troisième, cinquième et sixième photos : le fin cercle rougeâtre de la chromosphère est visible ; photo centrale : le halo blanc est la partie la plus basse de la couronne solaire. Il faut attendre que la Lune couvre exactement tout le disque solaire pour la voir. Crédit : Observatoire de Paris - BASS 2000

Le Soleil, une étoile relativement banale

Malgré ses dimensions colossales à l'échelle de la Terre, le Soleil n'a rien d'exceptionnel dans la galaxie : il existe des étoiles 100 000 fois plus lumineuses que lui, et d'autres 100 000 fois moins lumineuses ! On peut en juger sur le diagramme ci-dessous, où la luminosité des étoiles est figurée en fonction de leur température de surface (correspondant à la classe spectrale, des étoiles bleues très chaudes aux étoiles rouges plus froides : pensez qu'une barre de fer chauffée à blanc est plus chaude qu'une barre de fer chauffée au rouge).

On peut considérer le Soleil, et toute autre étoile, comme un « **corps noir** » sphérique, c'est-à-dire un corps qui ne réfléchit aucune lumière, et dont le rayonnement reflète donc directement la température. Cette relation entre luminosité L et température T s'exprime dans la **loi de Stephan-Boltzmann** : $L = \sigma T^4$ où σ est une constante et L s'exprime par unité de surface. Cette relation est très utile pour notre connaissance des étoiles : lorsqu'on connaît leur luminosité et leur température de surface, on peut estimer leur taille. En effet, la luminosité totale d'une étoile est proportionnelle à sa surface S , fonction du rayon R : $S = 4\pi R^2$. Au final, la luminosité totale est donc proportionnelle au carré du rayon et à la puissance quatrième de la température : $L \propto S^2 T^4$. On trouve ainsi que l'étoile Bételgeuse, plus froide que le Soleil mais 140 000 fois plus brillante, a un rayon de 800 millions de kilomètres, plus de 1000 fois le rayon du Soleil ! C'est une **géante rouge**. Or le Soleil, lorsqu'il aura épuisé son combustible hydrogène dans 5 milliards d'années, deviendra lui aussi une géante rouge. C'en sera alors fini de la vie sur Terre...



Exercice d'application (difficile !): test écrit 2010 (question proche dans le test écrit 2011). Dans quelques milliards d'années, notre Soleil évoluera en une géante rouge. Comment changera la température moyenne à la surface de la Terre par rapport à la température actuelle, lorsque le Soleil sera une géante rouge d'un rayon de $1,12 \times 10^7$ km avec une température de surface diminuant jusqu'à 2900 K ? Le rayon actuel du Soleil est de 7×10^5 km, et sa température de surface actuelle est de 5800 K. Négligez le changement probable d'albédo de la Terre. La température terrestre évoluera d'un facteur a) 4 b) 2 c) $\frac{1}{2}$ d) $\frac{1}{4}$ e) pas d'évolution ?

Réponse : On se souvient que la luminosité d'une étoile est proportionnelle à sa surface, donc au carré de son rayon, ainsi qu'à la puissance quatrième de sa température : $L \propto R^2 T_S^4$. En outre, on suppose que la Terre est elle aussi un corps noir : elle absorbe toute l'énergie reçue du Soleil et rayonne à l'équilibre la même quantité d'énergie, donc la température de la surface de la Terre à la puissance quatrième doit être proportionnelle à la luminosité du Soleil, aujourd'hui comme dans quelques milliards d'années : $T_T^4 \propto L$

On a donc l'égalité

$$\begin{aligned} (T_T^4 / R^2 T_S^4)_{\text{actuel}} &= (T_T^4 / R^2 T_S^4)_{\text{futur}} \\ T_{T \text{ futur}}^4 / T_{T \text{ actuel}}^4 &= (R^2 T_S^4)_{\text{futur}} / (R^2 T_S^4)_{\text{actuel}} \\ (T_{T \text{ futur}} / T_{T \text{ actuel}})^4 &= 16 \\ T_{T \text{ futur}} / T_{T \text{ actuel}} &= 2 \end{aligned}$$

La température moyenne de la Terre sera donc deux fois plus élevée !