



EXPO

Livret d'exposition

# L'énergie des étoiles

 **forum des Sciences**  
Centre François Mitterrand

**Nord**  
Le Département est là →

# L'énergie des étoiles

Son origine, sa nature  
et ses effets

Comment les étoiles font-elles pour briller aussi longtemps ? Cette énigme de l'énergie stellaire a tenu en haleine des générations de scientifiques !

Le Soleil, seule étoile que nous pouvons étudier de près, a fait l'objet de bien des hypothèses et calculs. Et s'il était constitué de charbon et d'oxygène en train de brûler ? Dans ce cas, il se consumerait en seulement 5 000 ans. Et si son énergie provenait d'un lent effondrement sur lui-même ? Il s'éteindrait en un peu plus de 20 000 ans. Et si ...

Jusqu'au début du XXème siècle, aucune source d'énergie connue alors ne peut expliquer comment le Soleil brille depuis plus de cent millions d'années ! La physique contemporaine a depuis mis un terme à la controverse.

D'où vient l'énergie des étoiles ? Comment se transfère-t-elle du centre vers la surface ? Quelles en sont les incidences sur les planètes environnantes ? Maintenant que les astronomes en comprennent les mécanismes, d'ambitieux projets espèrent la reproduire sur Terre comme source d'énergie quasi inépuisable.

Le Forum départemental des Sciences vous invite à plonger au cœur des étoiles et à découvrir le secret de leur longévité.



Crédits .....  
Photos et illustrations astronomiques : NASA, Hubble, ESA, ATG Medialab, STScI, JPL, ESO, US Air Force, Alain Riazuelo, Forum départemental des Sciences / Portraits : National Portrait Gallery, Smithsonian Institution, Library of Congress, Los Alamos National Laboratory / Tokamac : Rswilcox



Qu'est-ce qu'une étoile ?

Une étoile est une gigantesque sphère de gaz brûlant et lumineux.



**Le Soleil contient aujourd'hui près de 74% d'hydrogène et 25% d'hélium.**

**Les gaz d'une étoile sont maintenus ensemble par gravité.**

L'étoile ne s'effondre pas sur elle-même car l'énergie qui se dégage de son cœur contrebalance la gravité.

**Au cœur de l'étoile, les conditions de pression et de température sont extrêmes.** La température peut y atteindre des centaines de millions de degrés.

**La différence de température entre le cœur et la surface de l'étoile entraîne un flux d'énergie, du centre vers l'extérieur.**

Les gaz de surface sont ainsi chauffés entre 2 500°C et 50 000°C selon le type d'étoile.

**La quantité d'énergie qui s'échappe dépend surtout de la masse de l'étoile.**

Les étoiles évoluent en taille et en luminosité tout au long de leur existence.



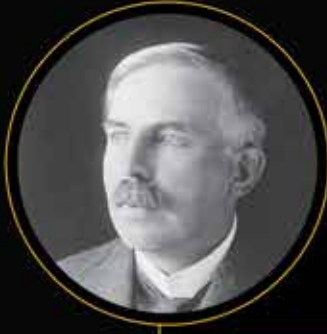
En 1924, **Cécilia Payne-Gaposchkin** (1900-1979) comprend que les étoiles sont principalement constituées d'hydrogène. Les éléments plus lourds, comme le carbone et l'oxygène, abondants sur notre planète, y sont rares.



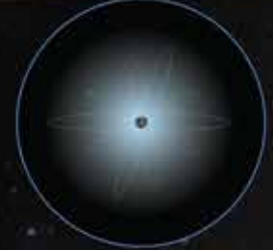
## D'où vient l'énergie des étoiles ?

Au cœur des étoiles, des réactions de fusion nucléaire libèrent de grandes quantités d'énergie.

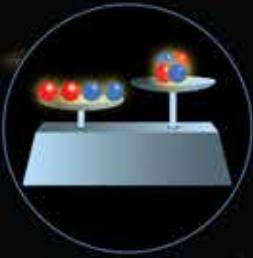
Grâce à la physique de l'infiniment petit, les scientifiques ont compris comment brillent les étoiles. Lorsqu'une étoile est assez massive, la pression extrême des gaz dans son cœur fait monter la température au-delà de 8 millions de degrés. Dans ces conditions, des noyaux d'hydrogène peuvent fusionner pour donner des noyaux d'hélium. Cette transformation libère de l'énergie.



En 1911, **Ernest Rutherford** (1871-1937) comprend que les constituants de la matière, les atomes, possèdent un noyau. Ce noyau est lui-même composé de particules : les nucléons.



Modèle atomique de Niels Bohr 1913

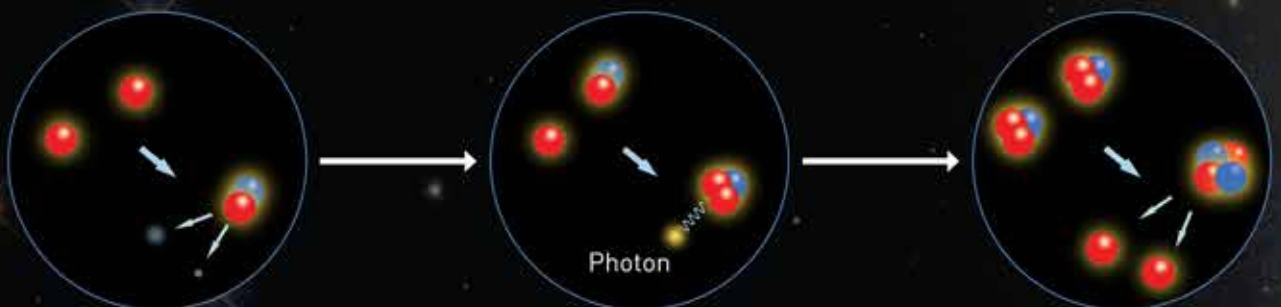


Dans les années 1920, les expériences réalisées par Francis Aston montrent qu'un noyau d'hélium est plus léger que la somme des masses des nucléons qui le constituent. En s'appuyant sur la formule d'Albert Einstein,  $E = mc^2$ , **Sir Arthur Eddington** (1882-1944) suggère que la différence de masse correspondrait à de l'énergie libérée au moment où les nucléons se sont liés. L'énergie du Soleil pourrait alors provenir de réactions nucléaires.



En 1938, **Hans Bethe** (1906-2005) propose une chaîne de réactions. En trois étapes, quatre noyaux d'hydrogène, soit quatre nucléons, se combinent pour donner un noyau d'hélium. Au cours du processus, diverses particules sont éjectées dont des particules lumineuses : les photons.

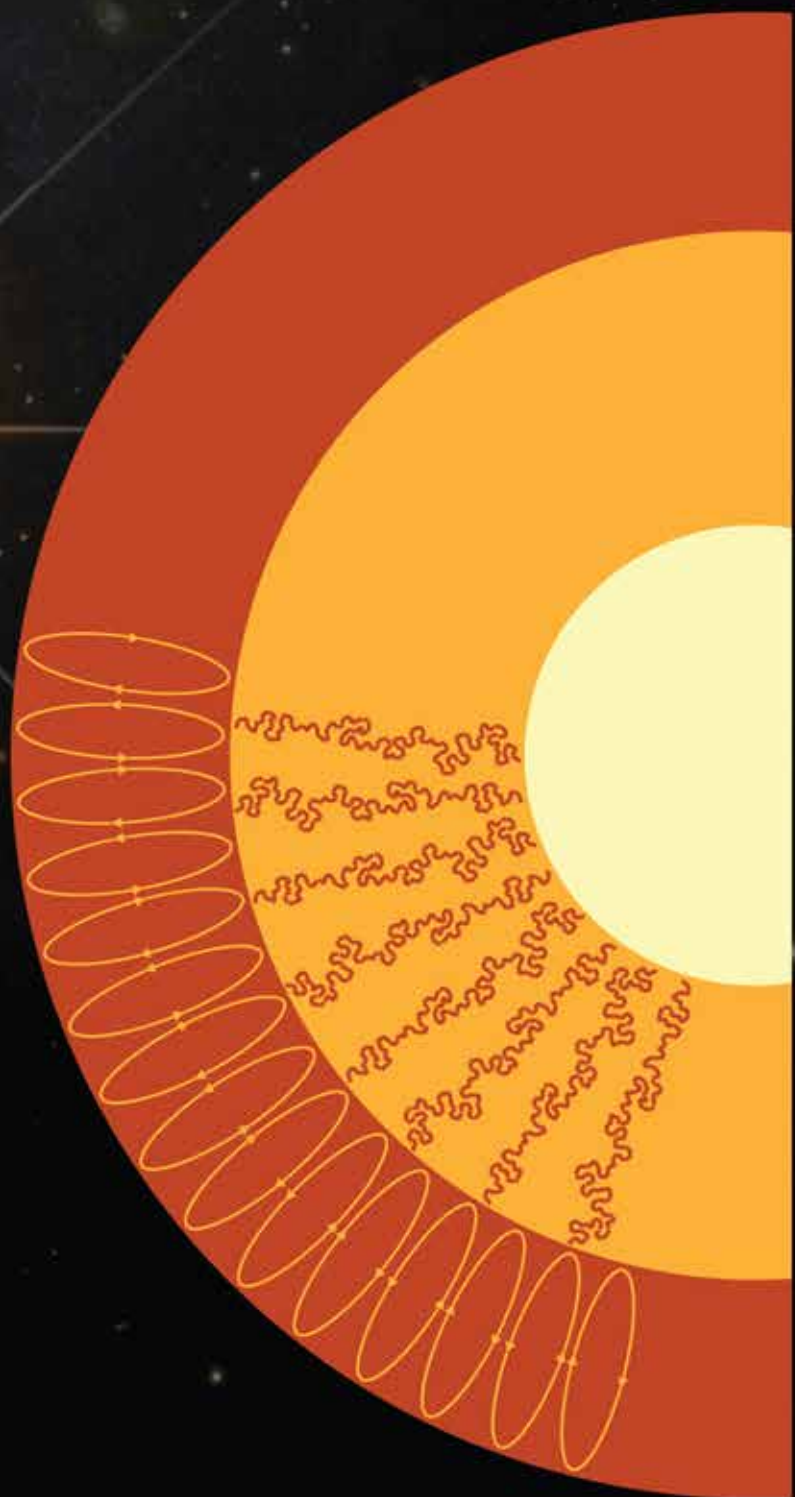
-  **Proton**  
Nucléon de charge électrique positive.
-  **Neutron**  
Nucléon électriquement neutre.



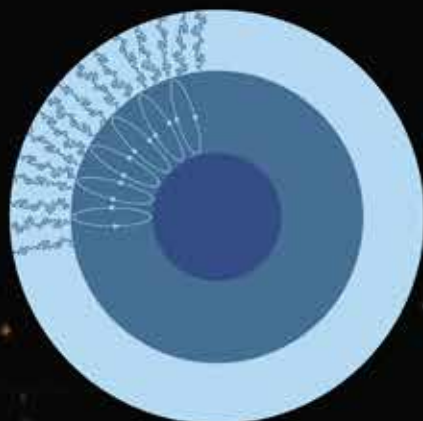
Représentations symboliques des éléments

Comment l'énergie passe-t-elle du cœur vers la surface de l'étoile ?

L'énergie des étoiles se transmet surtout par rayonnement.



Étoile de type solaire



Étoile massive

**Au cœur des étoiles, les réactions de fusion nucléaire libèrent de l'énergie lumineuse : les photons.**

Ceux-ci ne peuvent pas se déplacer librement vers la surface.

**Dans la zone radiative, les photons entrent sans cesse en collision avec les gaz de l'étoile.**

Lors d'une collision, les particules de gaz absorbent le photon puis en réémettent un autre plus ou moins énergétique. L'énergie se transfère par une suite de rayonnements.

**Dans la zone convective, le brassage des gaz fait remonter de l'énergie en surface.**

Comme dans une casserole où chauffe de l'eau, la chaleur se transmet des profondeurs vers la surface par de grands mouvements d'ensemble du gaz.



## De quoi est faite l'énergie libérée par la surface de l'étoile ?

### La lumière

**Seule une partie des rayonnements lumineux émis par l'étoile est visible pour l'œil humain.**

Cette lumière blanche est un mélange de lumières colorées : rouge, jaune, vert, bleu et violet.

**Le spectre électromagnétique est l'ensemble des rayonnements visibles ou non.**

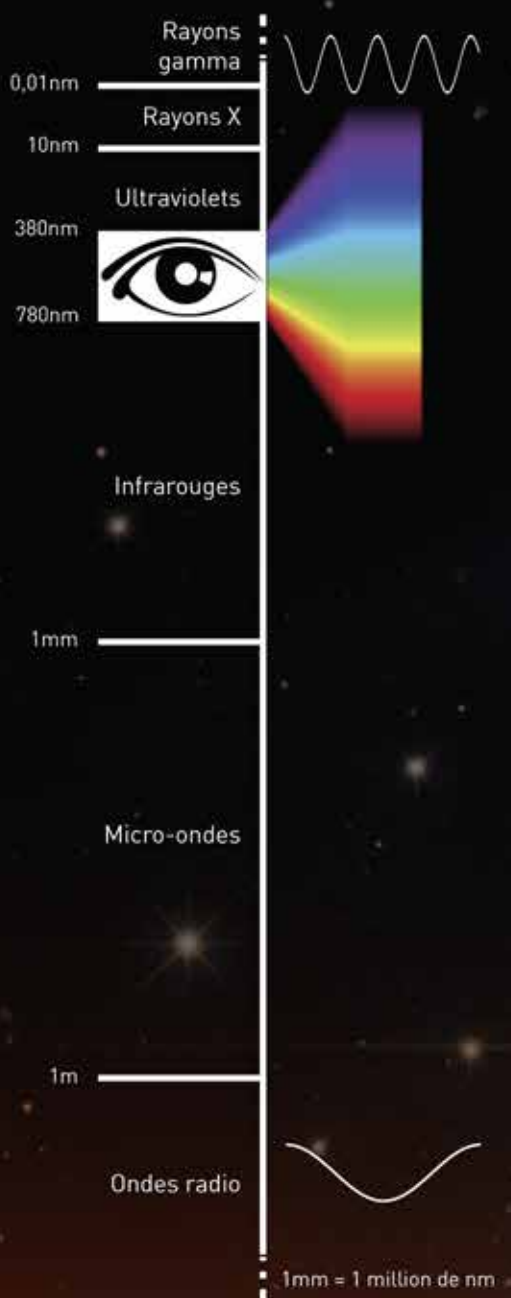
La lumière est constituée de photons, qui se comportent comme des ondes. Ces dernières se propagent de proche en proche et modifient leur environnement au passage, un peu comme des vagues qui se propagent à la surface de l'eau.



La distance qui sépare deux creux, ou deux crêtes, détermine la longueur de l'onde. Plus la longueur d'onde est courte, plus le rayonnement est énergétique.



**L'étoile libère de l'énergie sous forme de lumières et de particules.**



### Le vent stellaire

**L'étoile émet des particules chargées électriquement.**

Ce flux continu de matière varie en vitesse et en température selon l'activité de l'étoile. C'est le vent solaire qui provoque les aurores polaires.

La lumière,  
source d'informations !

Les différents rayonnements trahissent la  
présence des phénomènes physiques qui  
les ont produits.

Dans la Nébuleuse de la Lagune,  
les jeunes étoiles en formation ne  
sont pas visibles à cause des épais  
nuages de gaz et de poussières qui  
les entourent.



Mais elles sont observées en lumière  
infrarouge car ce rayonnement est  
moins bloqué ou dispersé par les gaz  
et les poussières qu'il rencontre.



En 1800, l'astronome **William Herschel** (1738-1822) place des thermomètres dont l'embout est peint en noir dans chaque couleur du spectre lumineux et en dehors de celui-ci. Il observe que vers la lumière rouge, la température mesurée est plus élevée. Mais au-delà du rouge, là où nos yeux ne voient rien, la température continue d'augmenter ! Il découvre ainsi l'existence d'un rayonnement invisible à nos yeux : le rayonnement infrarouge.

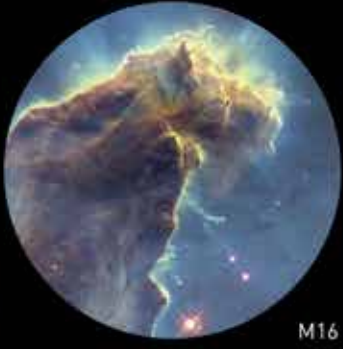


# Comment se forment les étoiles ?

Dans des régions plus concentrées en matière, des gaz et des poussières se rassemblent progressivement pour former différents types d'étoiles.

## Nébuleuse

Dans le milieu interstellaire, des gaz et des particules de poussières sont inégalement dispersés. Dans les nébuleuses, la matière est plus concentrée et les étoiles s'y forment en groupes.



## Protoétoile

Des poches de gaz tournent sur elles-mêmes et se concentrent. Une protoétoile émerge en quelques millions d'années. Dans le disque de matière qui l'entoure, des planètes peuvent éventuellement se former.



À partir de 0,08 fois la masse du Soleil, la gravité est suffisante pour que la pression des gaz au cœur fasse monter la température au-delà de 8 millions de degrés. Le noyau de la protoétoile est assez chaud et dense pour que la fusion nucléaire commence. La contraction sur elle-même de la protoétoile finit par s'arrêter car la pression de rayonnement, qui pousse les gaz vers l'extérieur, vient contrebalancer la gravité. Différents types d'étoiles se forment.

## Étoile naine rouge

Moins de 0,5 M<sub>☉</sub>

● Proxima Centauri  
0,12 M<sub>☉</sub>

## Étoile de masse moyenne

Entre 0,5 et 8 M<sub>☉</sub>

● Alpha Centauri B  
0,9 M<sub>☉</sub>

● Soleil

● Procyon A  
1,62 M<sub>☉</sub>

● Véga  
2,11 M<sub>☉</sub>

## Étoile géante bleue

Plus de 8 M<sub>☉</sub>

● Bellatrix  
8 à 9 M<sub>☉</sub>

● Zéta de la Poupe  
59 M<sub>☉</sub>

1 M<sub>☉</sub> =  
1 fois la  
masse  
solaire

## Une naine brune est une étoile « manquée ».

En dessous de 0,08 fois la masse du Soleil, la température et la pression au cœur ne seront pas suffisantes pour que des réactions de fusion nucléaire démarrent.



## Comment évoluent les différents types d'étoiles ?

Les étoiles passent l'essentiel de leur existence à transformer de l'hydrogène en hélium.

Au cours de son évolution, l'étoile fusionne seulement une partie de ses gaz et perd lentement de la masse.

Plus une étoile est massive, plus son espérance de vie est courte.

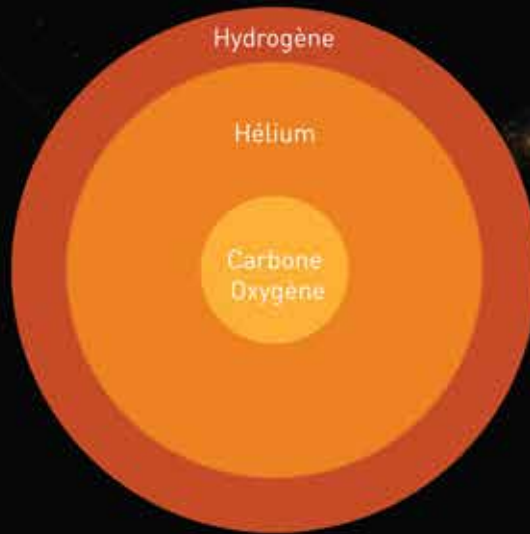
Si la gravité est plus forte, les nucléons au cœur de l'étoile sont plus proches entre eux et leurs collisions plus fréquentes. Les réactions nucléaires sont plus nombreuses et plus énergétiques. Les réserves au cœur de l'étoile s'épuisent plus rapidement.



### Étoile naine rouge

Moins de 0,5 M $\odot$

À cause de sa faible masse, la température du cœur est juste assez élevée pour que l'hydrogène fusionne en hélium.



### Étoile de masse moyenne

Entre 0,5 et 8 M $\odot$

Lorsque les réactions de fusion de l'hydrogène s'épuisent dans le cœur, l'étoile se dilate et se refroidit : elle devient une géante rouge.

Au centre, la pression diminue et le cœur se contracte, s'échauffe puis l'hélium fusionne à son tour en carbone et oxygène.

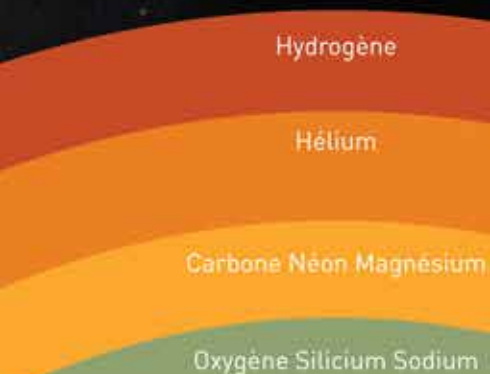
1 M $\odot$  = 1 fois la masse solaire

### Étoile géante bleue

Plus de 8 M $\odot$

Au-delà de 8 fois la masse du Soleil, l'étoile enchaînera de nouvelles réactions de fusion : l'hélium en carbone et oxygène, le carbone en néon et magnésium... jusqu'au fer sur des cycles de plus en plus rapides.

Les éléments issus des réactions précédentes continuent à fusionner en couches successives et alimentent en éléments plus lourds la fusion des couches plus profondes.



# Que se passe-t-il lorsque la fusion s'arrête ?

C'est surtout la masse de départ qui détermine la fin de l'étoile.

1 M $\odot$  = 1 fois la masse solaire

Lorsque les réactions de fusion nucléaire s'épuisent, la pression de rayonnement chute. La gravité prend le dessus et le cœur de l'étoile s'effondre.

Le reste de ses gaz finit par se disperser. Il enrichit le milieu interstellaire où de nouvelles étoiles pourront se former.

## Fin d'une étoile naine rouge

Moins de 0,5 M $\odot$



## Étoile naine noire

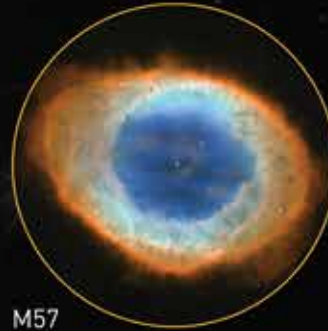
Les étoiles naines rouges se refroidiraient lentement, émettant ainsi moins de lumière.

## Fin d'une étoile de masse moyenne

Entre 0,5 et 8 M $\odot$



NGC6302



M57

## Nébuleuse planétaire

Pour les étoiles de masse moyenne, c'est lentement que l'enveloppe externe se désolidarise du cœur et se disperse.

## Étoile naine blanche

Au centre de la nébuleuse planétaire, le résidu du cœur, ou naine blanche, est encore très chaud mais il se refroidira inexorablement car il ne s'y produit plus de réaction nucléaire.

## Fin d'une étoile géante bleue

Plus de 8 M $\odot$

## Supernova

Pour les étoiles de plus de 8 fois la masse du Soleil, la fin d'existence est brutale. Le noyau de fer s'effondre sur lui-même. La matière autour du cœur chute brutalement puis rebondit sur le noyau et une onde de choc expulse violemment les couches de gaz externes.

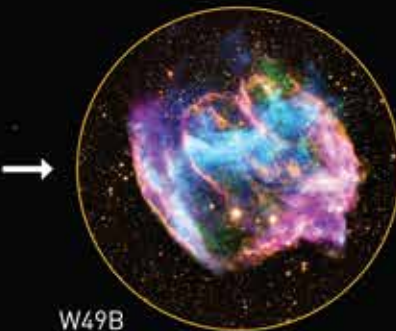


SN1987A

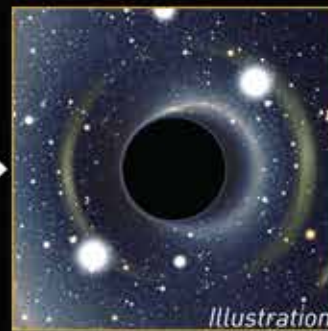


## Étoile à neutrons

C'est le résidu d'un cœur d'étoile massive. L'étoile de départ ferait 10 à 15 fois la masse du Soleil.



W49B



Illustration

## Trou noir stellaire

C'est le résidu d'un cœur d'étoile très massive. La gravité y est extrême. L'étoile de départ ferait plus de 15 fois la masse du Soleil.



## La lumière, source de vie ?

Les astronomes délimitent la zone d'habitabilité d'une étoile en fonction de la nature et de l'intensité de ses rayonnements.

Sur Terre, la vie est d'abord apparue dans les mers et les océans. En conséquence, on définit la zone d'habitabilité comme la région dans laquelle de l'eau pourrait se trouver durablement à l'état liquide à la surface d'un astre. Certaines conditions de température et de pression atmosphérique sont nécessaires.

La température à la surface d'un astre dépend en grande partie de sa distance à l'étoile. Plus l'intensité lumineuse de l'étoile est forte, plus sa zone d'habitabilité est éloignée. La présence d'une atmosphère planétaire joue également un rôle car elle entraîne un effet de serre plus ou moins important.

La pression dépend de la densité de l'atmosphère.

Une planète située dans la zone d'habitabilité de son étoile ne possède pas obligatoirement d'eau liquide en surface et n'est pas forcément accueillante pour la vie.



# Notre étoile, le Soleil

Il est impossible d'observer l'intérieur du Soleil. Cependant, les astronomes ont déduit son fonctionnement en observant l'activité de sa surface et en analysant son rayonnement.

## La photosphère

Seule partie visible du Soleil, elle émet la plus grande partie de sa lumière.

## La couronne

La haute atmosphère se dilue progressivement et se fond dans le milieu interplanétaire.

## La chromosphère

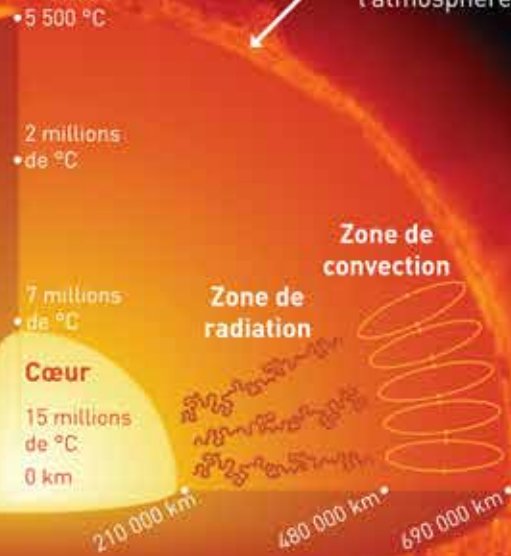
C'est la partie basse de l'atmosphère solaire.

## Les taches sombres

Moins chaudes, elles sont liées à des phénomènes magnétiques.

## Les granules

Ils trahissent les mouvements de matière chaude qui bouillonne.



## Zone de convection

## Zone de radiation

## Cœur

15 millions de °C  
0 km

210 000 km

480 000 km

690 000 km

À chaque seconde, environ 600 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent au cœur du Soleil. Cette réaction produit près de 596 millions de tonnes d'hélium et libère ainsi une grande quantité d'énergie.

## Les protubérances

Ces jets de gaz suivent les lignes du champ magnétique.

## Puissance rayonnée

environ 380 000 000 000 000 milliards de watts



## Vénus, née sous une bonne étoile ?

En apparence, Vénus ressemble à la Terre. Elle fait presque la même taille que notre planète et possède aussi une atmosphère. Vénus a peut-être appartenu à la zone d'habitabilité du Soleil dans un passé lointain, lorsque la luminosité de notre étoile était moins forte.

Aujourd'hui, c'est une fournaise où la température dépasse les 450°C. L'atmosphère vénusienne laisse passer la lumière du Soleil. En revanche, les gaz à effet de serre qu'elle contient empêchent une grande partie des rayonnements réémis par le sol de s'échapper vers l'espace.



## La Terre, une zone protégée !

C'est grâce au Soleil que la vie a pu se développer sur Terre. La lumière du Soleil est une source d'énergie vitale pour la majorité des espèces de notre planète et constitue le point de départ de la plupart des chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine du cycle de l'eau, des climats et des saisons, ainsi que des courants marins.

La lumière solaire atteint notre planète en 8 minutes. L'atmosphère terrestre absorbe ou renvoie vers l'espace la quasi-totalité des rayons nocifs : gamma, X et une grande partie des UV. Sans cette protection, la surface terrestre serait stérile. Et sans les gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère, la Terre gèlerait à  $-18^{\circ}\text{C}$  alors que sa température moyenne actuelle est d'environ  $15^{\circ}\text{C}$ .



Les particules de vent solaire atteignent la Terre en quelques jours seulement. Le champ magnétique terrestre, constitue un bouclier naturel qui les empêche de nous frapper directement. Sans lui, la vie ne se serait probablement pas développée sur notre planète et la Terre ressemblerait peut-être à Mars.





## Mars, un monde désertique !

À cause d'une pression atmosphérique trop faible et d'une température trop basse, l'eau ne peut se maintenir à l'état liquide à la surface de la planète rouge.

Mars aurait perdu une grande partie de son atmosphère et de son eau à cause de la disparition de son champ magnétique. Celui-ci dévie les particules qui nous viennent du Soleil. Sans cette protection, le vent solaire aurait pu à peu balayé l'atmosphère de Mars.



## L'énergie solaire sur Terre

## L'énergie des étoiles est colossale !

### L'énergie de fusion

Des projets de recherche sont en cours pour parvenir à maîtriser la fusion nucléaire.

Dans les conditions terrestres, une des difficultés consiste à atteindre des températures très élevées, de l'ordre de 150 millions de °C.

La fusion permettrait de produire de l'énergie en générant peu de déchets radioactifs et pas de gaz à effet de serre. De plus, les noyaux d'atomes

légers sont présents en grande quantité sur notre planète et constituent donc une ressource qui semble quasi inépuisable.

Dans les centrales nucléaires actuelles, l'énergie est obtenue en scindant des noyaux lourds tels que l'uranium. La fission est plus facile à contrôler mais, avec la même quantité de combustible, elle produit moins d'énergie et plus de déchets que la fusion.



### L'énergie solaire

Un m<sup>2</sup> de la limite supérieure de l'atmosphère terrestre reçoit environ 1367 watts soit à peu près la puissance dégagée par un radiateur. L'exploitation de l'énergie solaire, thermique ou photovoltaïque, nous permet de produire de la chaleur ou de l'électricité.



Tokamak à San Diego  
Dispositif de confinement magnétique pour les réactions de fusion nucléaire.



**+ INFOS**

[forumdepartementaldessciences.fr](http://forumdepartementaldessciences.fr)

1, place François Mitterrand  
59650 **Villeneuve d'Ascq**  
Tél : 03 59 73 96 00