



Le Soleil

LE SOLEIL

Au programme

La naissance du Soleil

Les réactions thermonucléaires

L'équilibre hydrostatique

Description et caractéristiques du Soleil

L'observation du Soleil

L'avenir du Soleil

LE SOLEIL

Au programme

La naissance du Soleil

Les réactions thermonucléaires

L'équilibre hydrostatique

Description et caractéristiques du Soleil

L'observation du Soleil

L'avenir du Soleil

Le nuage primordial

Env. 75 % hydrogène

Env. 24 % hélium

Env. 1% du reste

Température : -250 à -260 °C

Densité : 1 000 atomes/cm³

Masse : 100 000 à plusieurs millions M_☉



L'effondrement du nuage primordial

Explosion d'une supernova
Onde de densité d'un bras

Fractionnement du nuage, effondrement gravitationnel

Naissances groupées : amas ouverts



Le proto-Soleil

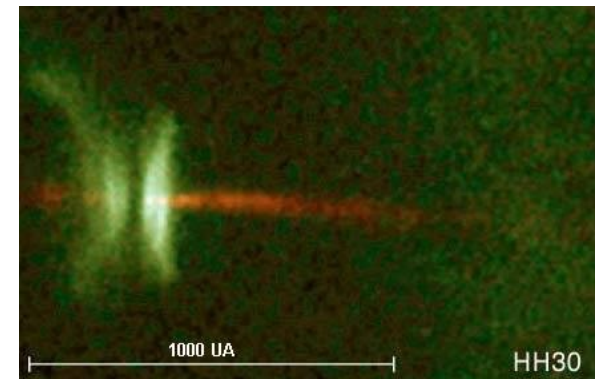
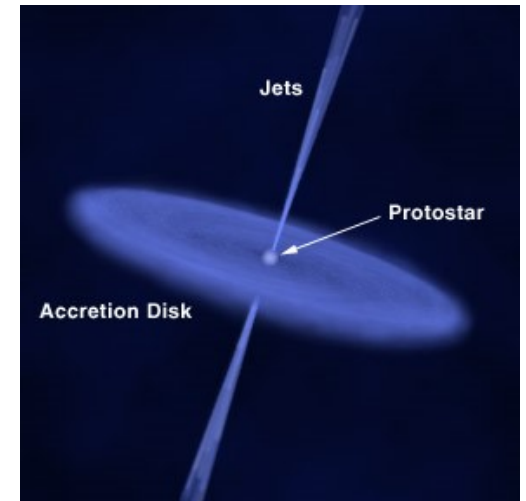
Effondrement en rotation \longrightarrow Echauffement

Création du disque

Jets perpendiculaires

Energie tirée de l'effondrement gravitationnel

Taille : 20 fois le système solaire

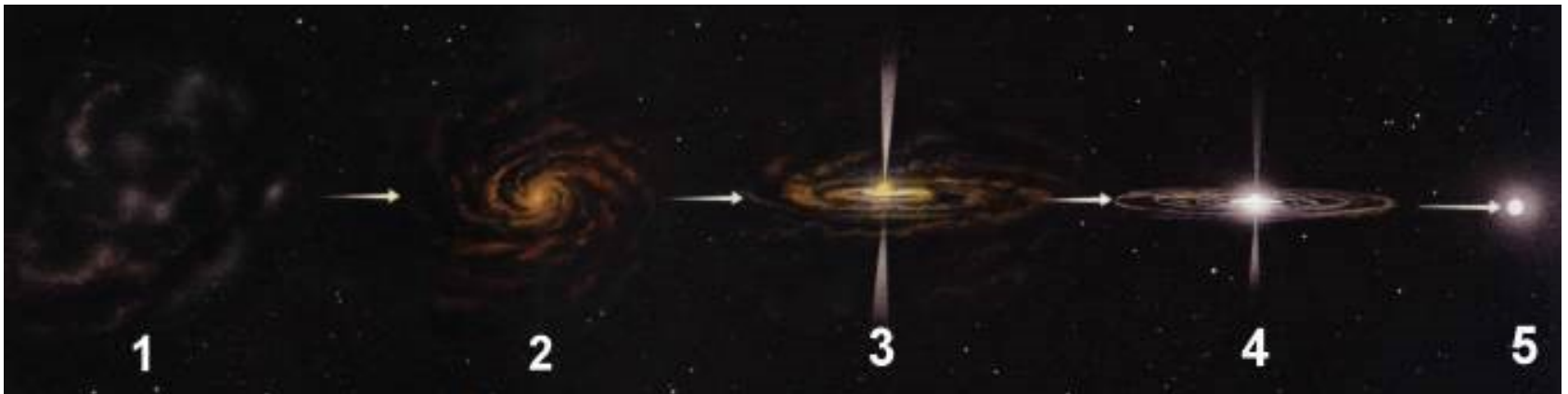


La naissance

Début des réactions nucléaires à 10/15 millions de degrés

Ejection du reste du cocon, mais pas tout...

40 millions d'années entre le début de l'effondrement et la naissance



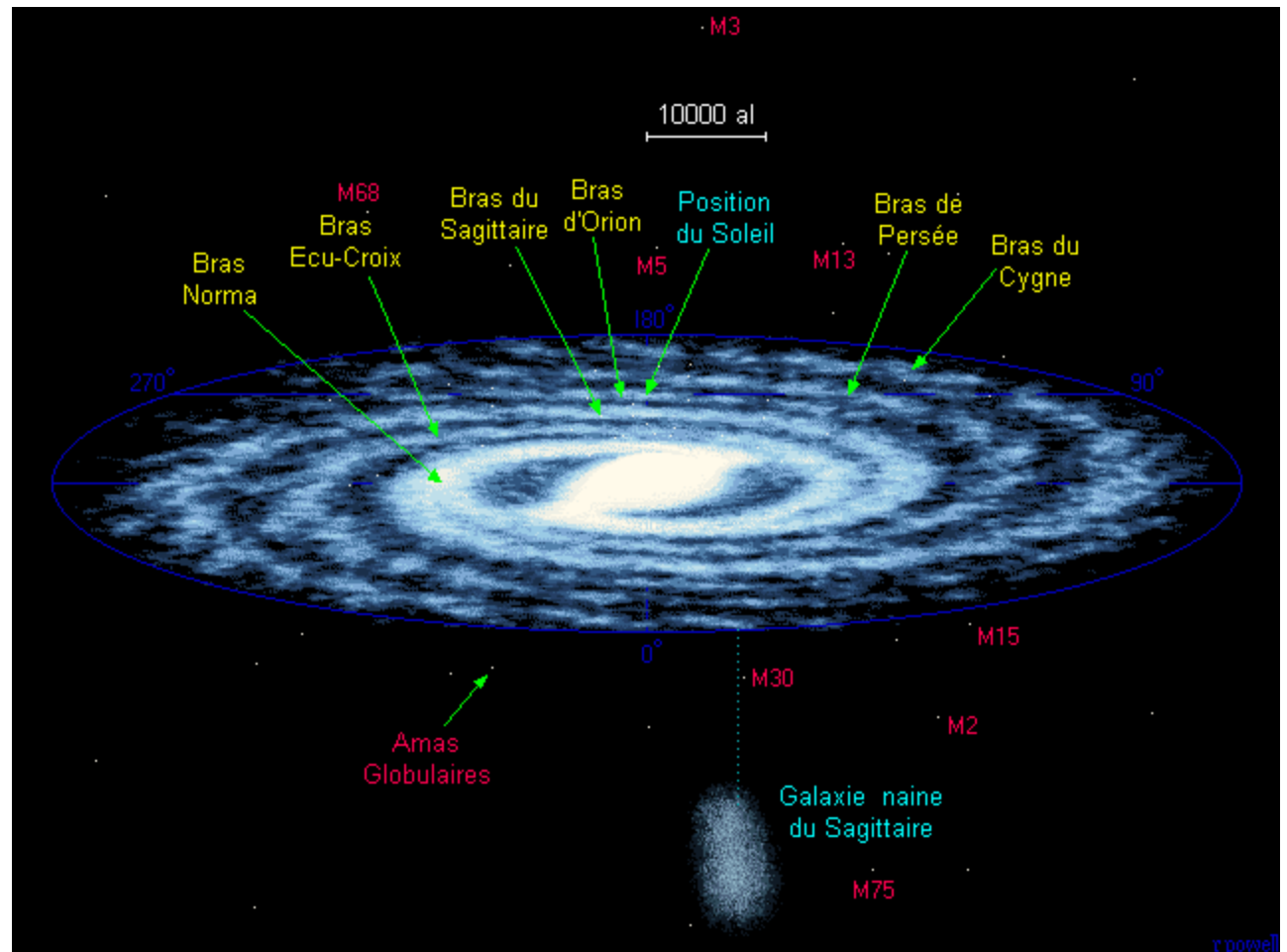
La naissance

Situation

28 000 al du centre de la Galaxie

Vitesse autour du centre : 216 km/s

1 tour en 245 millions d'années



LE SOLEIL

Au programme

La naissance du Soleil

Les réactions thermonucléaires

L'équilibre hydrostatique

Description et caractéristiques du Soleil

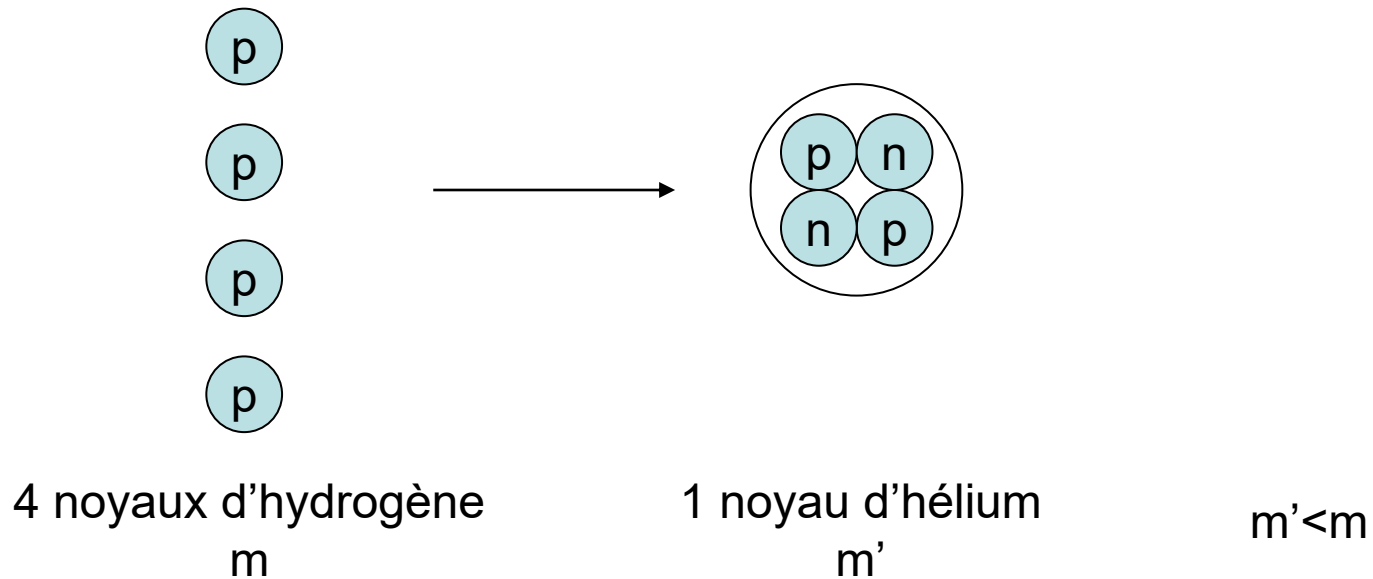
L'observation du Soleil

L'avenir du Soleil

Fusion des protons

Dans les réacteurs nucléaires : Fission

Dans le Soleil : Fusion



La différence de masse \longrightarrow Energie selon $E = mc^2$

Fusion des protons

Masse du Soleil : 2 000 milliards de milliards de milliards de kg ($2 \cdot 10^{30}$ kg)

Consommation du Soleil :

- 700 milliards de kg d'hydrogène par seconde.
- Durée de vie à ce rythme : 10 milliards d'années.

LE SOLEIL

Au programme

La naissance du Soleil

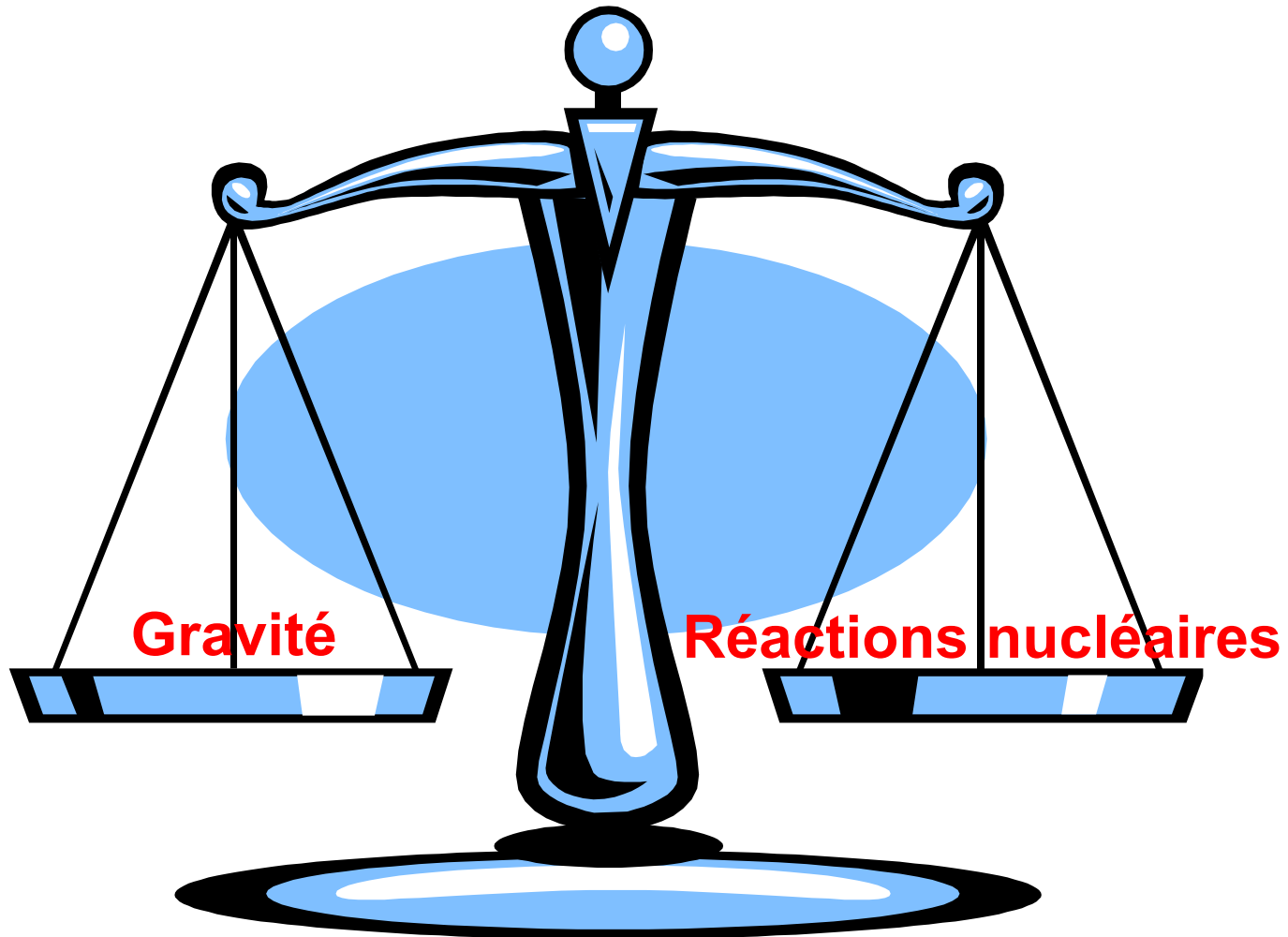
Les réactions thermonucléaires

L'équilibre hydrostatique

Description et caractéristiques du Soleil

L'observation du Soleil

L'avenir du Soleil



LE SOLEIL

Au programme

La naissance du Soleil

Les réactions thermonucléaires

La séquence principale

L'équilibre hydrostatique

Description et caractéristiques du Soleil

L'observation du Soleil

L'avenir du Soleil

Caractéristiques du Soleil

Distance moyenne à la Terre	149 597 870,691 km	C'est la valeur officielle de l'Unité Astronomique (ua)
Distance maximale à la Terre	152 100 000 km	Aphélie
Distance minimale à la Terre	147 100 000 km	Périhélie
Rayon équatorial	696 000 km	109 fois la Terre. Le soleil est aplati aux pôles. L'aplatissement varie avec l'activité du Soleil. Le rayon est connu avec une incertitude de 0,02%.
Rotation à l'équateur	25,4 jours	La rotation de la surface du Soleil est différentielle car l'intérieur n'est pas solide. Le noyau par contre tourne comme un solide.
Rotation près des pôles	36 jours	
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30}$ kg	Soit 333 000 fois la Terre. Il concentre 99,8% de la masse du système solaire. La masse du Soleil est connue à 0,02% près. 10^{60} atomes
Luminosité	$3,826 \cdot 10^{26}$ W	Quantité totale d'énergie qu'il rayonne ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$)
Constante solaire	$1360 \text{ W} / \text{m}^2$	Quantité d'énergie reçue sur Terre sur une surface de 1 m^2
Magnitude absolue	4,83	
Magnitude apparente	-26,74	L'objet le plus brillant du ciel
Température de surface moyenne	5 800 K	$1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$
Température du cœur	15 millions de degrés	
Densité du cœur	150 tonnes/m ³	Soit 150 fois celle de l'eau
Densité moyenne	1,41 tonnes / m ³	0,25 fois celle de la Terre
Pression au cœur	250 milliards d'atmosphères	
Pression en surface	11 200 atmosphères	
Gravité à la surface	274 m.s^{-2}	Contre $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre

Caractéristiques du Soleil

Distance moyenne à la Terre	149 597 870,691 km	C'est la valeur officielle de l'Unité Astronomique (ua)
Distance maximale à la Terre	152 100 000 km	Aphélie
Distance minimale à la Terre	147 100 000 km	Périhélie
Rayon équatorial	696 000 km	109 fois la Terre. Le soleil est aplati aux pôles. L'aplatissement varie avec l'activité du Soleil. Le rayon est connu avec une incertitude de 0,02%.
Rotation à l'équateur	25,4 jours	La rotation de la surface du Soleil est différentielle car l'intérieur n'est pas solide. Le noyau par contre tourne comme un solide.
Rotation près des pôles	36 jours	
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30}$ kg	Soit 333 000 fois la Terre. Il concentre 99,8% de la masse du système solaire. La masse du Soleil est connue à 0,02% près. 10^{60} atomes
Luminosité	$3,826 \cdot 10^{26}$ W	Quantité totale d'énergie qu'il rayonne ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$)
Constante solaire	$1360 \text{ W} / \text{m}^2$	Quantité d'énergie reçue sur Terre sur une surface de 1 m^2
Magnitude absolue	4,83	
Magnitude apparente	-26,74	L'objet le plus brillant du ciel
Température de surface moyenne	5 800 K	$1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$
Température du cœur	15 millions de degrés	
Densité du cœur	150 tonnes/m ³	Soit 150 fois celle de l'eau
Densité moyenne	1,41 tonnes / m ³	0,25 fois celle de la Terre
Pression au cœur	250 milliards d'atmosphères	
Pression en surface	11 200 atmosphères	
Gravité à la surface	274 m.s^{-2}	Contre $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre

Caractéristiques du Soleil

Distance moyenne à la Terre	149 597 870,691 km	C'est la valeur officielle de l'Unité Astronomique (ua)
Distance maximale à la Terre	152 100 000 km	Aphélie
Distance minimale à la Terre	147 100 000 km	Périhélie
Rayon équatorial	696 000 km	109 fois la Terre. Le soleil est aplati aux pôles. L'aplatissement varie avec l'activité du Soleil. Le rayon est connu avec une incertitude de 0,02%.
Rotation à l'équateur	25,4 jours	La rotation de la surface du Soleil est différentielle car l'intérieur n'est pas solide. Le noyau par contre tourne comme un solide.
Rotation près des pôles	36 jours	
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30}$ kg	Soit 333 000 fois la Terre. Il concentre 99,8% de la masse du système solaire. La masse du Soleil est connue à 0,02% près. 10^{60} atomes
Luminosité	$3,826 \cdot 10^{26}$ W	Quantité totale d'énergie qu'il rayonne ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$)
Constante solaire	$1360 \text{ W} / \text{m}^2$	Quantité d'énergie reçue sur Terre sur une surface de 1 m^2
Magnitude absolue	4,83	
Magnitude apparente	-26,74	L'objet le plus brillant du ciel
Température de surface moyenne	5 800 K	$1 \text{ K} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C} - 0 \text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15 \text{ K}$
Température du cœur	15 millions de degrés	
Densité du cœur	150 tonnes/m ³	Soit 150 fois celle de l'eau
Densité moyenne	1,41 tonnes / m ³	0,25 fois celle de la Terre
Pression au cœur	250 milliards d'atmosphères	
Pression en surface	11 200 atmosphères	
Gravité à la surface	274 m.s^{-2}	Contre $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre

Caractéristiques du Soleil

Distance moyenne à la Terre	149 597 870,691 km	C'est la valeur officielle de l'Unité Astronomique (ua)
Distance maximale à la Terre	152 100 000 km	Aphélie
Distance minimale à la Terre	147 100 000 km	Périhélie
Rayon équatorial	696 000 km	109 fois la Terre. Le soleil est aplati aux pôles. L'aplatissement varie avec l'activité du Soleil. Le rayon est connu avec une incertitude de 0,02%.
Rotation à l'équateur	25,4 jours	La rotation de la surface du Soleil est différentielle car l'intérieur n'est pas solide. Le noyau par contre tourne comme un solide.
Rotation près des pôles	36 jours	
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30}$ kg	Soit 333 000 fois la Terre. Il concentre 99,8% de la masse du système solaire. La masse du Soleil est connue à 0,02% près. 10^{60} atomes
Luminosité	$3,826 \cdot 10^{26}$ W	Quantité totale d'énergie qu'il rayonne ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$)
Constante solaire	$1360 \text{ W} / \text{m}^2$	Quantité d'énergie reçue sur Terre sur une surface de 1 m^2
Magnitude absolue	4,83	
Magnitude apparente	-26,74	L'objet le plus brillant du ciel
Température de surface moyenne	5 800 K	$1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$
Température du cœur	15 millions de degrés	
Densité du cœur	150 tonnes/m ³	Soit 150 fois celle de l'eau
Densité moyenne	1,41 tonnes / m ³	0,25 fois celle de la Terre
Pression au cœur	250 milliards d'atmosphères	
Pression en surface	11 200 atmosphères	
Gravité à la surface	274 m.s^{-2}	Contre $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre

Caractéristiques du Soleil

Distance moyenne à la Terre	149 597 870,691 km	C'est la valeur officielle de l'Unité Astronomique (ua)
Distance maximale à la Terre	152 100 000 km	Aphélie
Distance minimale à la Terre	147 100 000 km	Périhélie
Rayon équatorial	696 000 km	109 fois la Terre. Le soleil est aplati aux pôles. L'aplatissement varie avec l'activité du Soleil. Le rayon est connu avec une incertitude de 0,02%.
Rotation à l'équateur	25,4 jours	La rotation de la surface du Soleil est différentielle car l'intérieur n'est pas solide. Le noyau par contre tourne comme un solide.
Rotation près des pôles	36 jours	
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30}$ kg	Soit 333 000 fois la Terre. Il concentre 99,8% de la masse du système solaire. La masse du Soleil est connue à 0,02% près. 10^{60} atomes
Luminosité	$3,826 \cdot 10^{26}$ W	Quantité totale d'énergie qu'il rayonne ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$)
Constante solaire	$1360 \text{ W} / \text{m}^2$	Quantité d'énergie reçue sur Terre sur une surface de 1 m^2
Magnitude absolue	4,83	
Magnitude apparente	-26,74	L'objet le plus brillant du ciel
Température de surface moyenne	5 800 K	$1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$
Température du cœur	15 millions de degrés	
Densité du cœur	150 tonnes/m ³	Soit 150 fois celle de l'eau
Densité moyenne	1,41 tonnes / m ³	0,25 fois celle de la Terre
Pression au cœur	250 milliards d'atmosphères	
Pression en surface	11 200 atmosphères	
Gravité à la surface	274 m.s^{-2}	Contre $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre

Caractéristiques du Soleil

Distance moyenne à la Terre	149 597 870,691 km	C'est la valeur officielle de l'Unité Astronomique (ua)
Distance maximale à la Terre	152 100 000 km	Aphélie
Distance minimale à la Terre	147 100 000 km	Périhélie
Rayon équatorial	696 000 km	109 fois la Terre. Le soleil est aplati aux pôles. L'aplatissement varie avec l'activité du Soleil. Le rayon est connu avec une incertitude de 0,02%.
Rotation à l'équateur	25,4 jours	La rotation de la surface du Soleil est différentielle car l'intérieur n'est pas solide. Le noyau par contre tourne comme un solide.
Rotation près des pôles	36 jours	
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30}$ kg	Soit 333 000 fois la Terre. Il concentre 99,8% de la masse du système solaire. La masse du Soleil est connue à 0,02% près. 10^{60} atomes
Luminosité	$3,826 \cdot 10^{26}$ W	Quantité totale d'énergie qu'il rayonne ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$)
Constante solaire	$1360 \text{ W} / \text{m}^2$	Quantité d'énergie reçue sur Terre sur une surface de 1 m^2
Magnitude absolue	4,83	
Magnitude apparente	-26,74	L'objet le plus brillant du ciel
Température de surface moyenne	5 800 K	$1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$
Température du cœur	15 millions de degrés	
Densité du cœur	150 tonnes/m ³	Soit 150 fois celle de l'eau
Densité moyenne	1,41 tonnes / m ³	0,25 fois celle de la Terre
Pression au cœur	250 milliards d'atmosphères	
Pression en surface	11 200 atmosphères	
Gravité à la surface	274 m.s^{-2}	Contre $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre

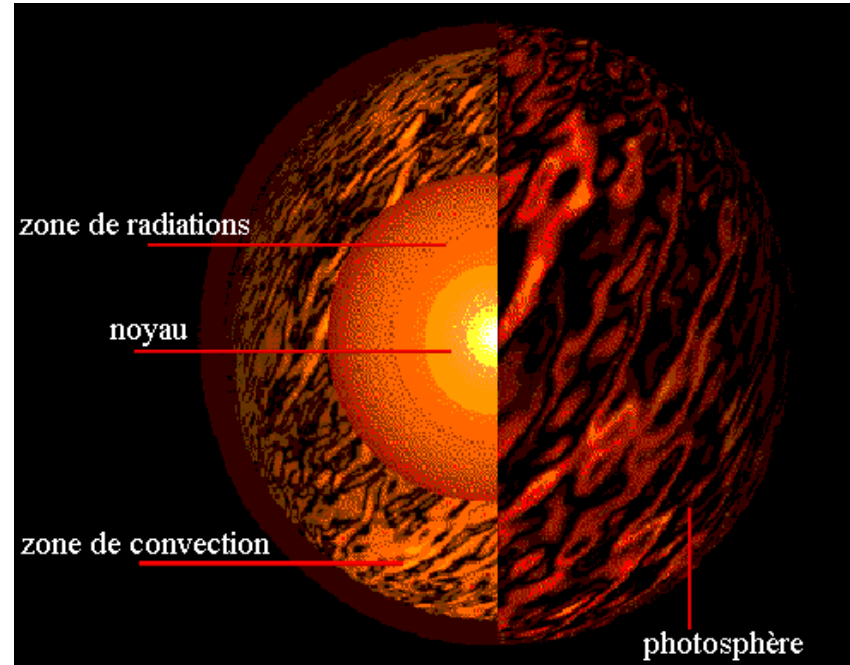
Composition interne

Le Soleil est divisé en 3 zones

Le cœur

La zone radiative

La zone convective



Composition interne

Le Cœur

Siège des réactions thermonucléaires

25 % du rayon

La moitié de la masse

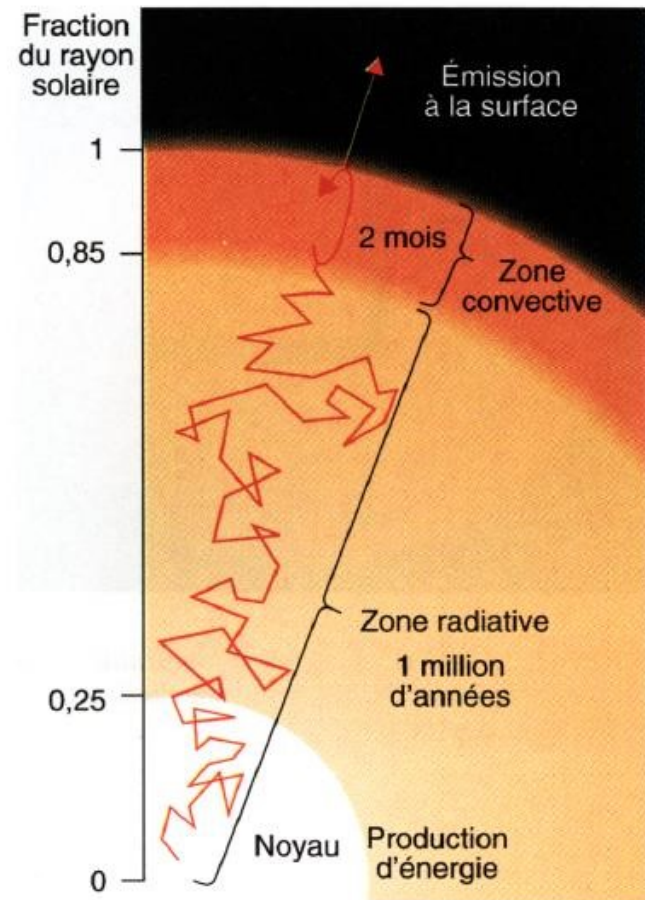
Composition interne

La zone radiative

60 % du rayon

Densité de 1 à 150

Un photon met 1 million d'années à sortir

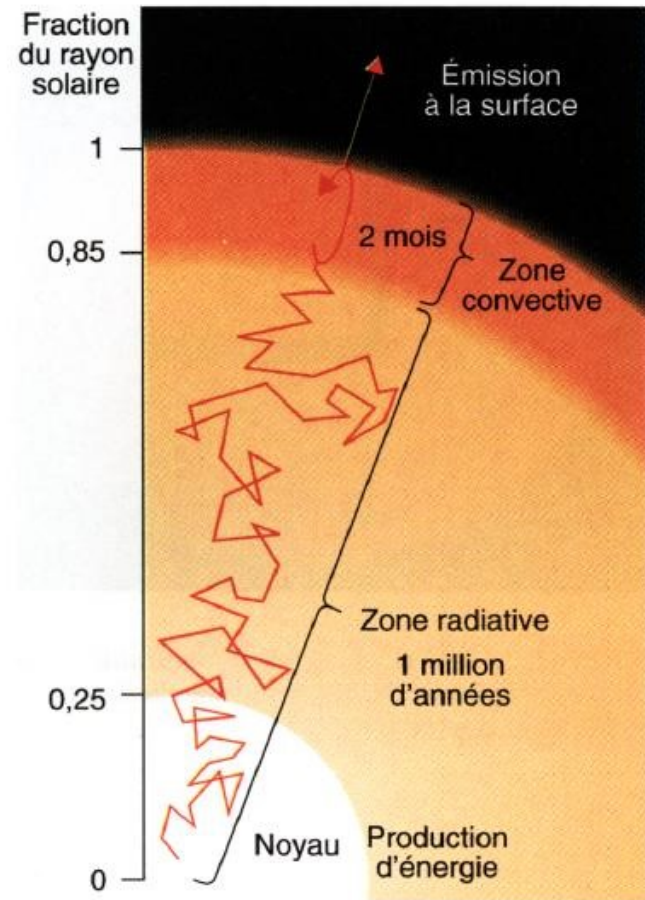


Composition interne

La zone convective

15 % du rayon

Un photon met 2 mois à sortir



Composition interne

Composition chimique

Hydrogène :	73,8 %
Hélium :	24,4 %
Le reste :	1,8 %

Le reste : carbone, azote, oxygène...

La composition n'est pas homogène (plus d'hélium dans le noyau...)

Composition externe

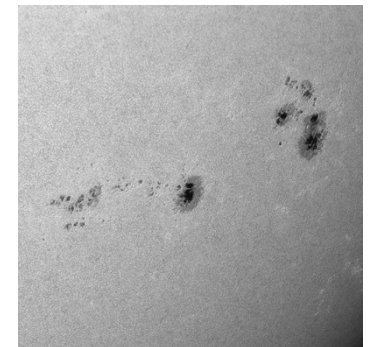
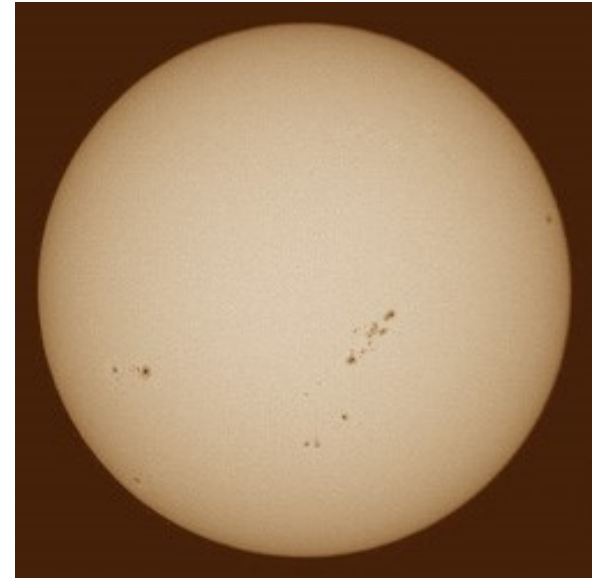
La photosphère

La « surface » visible.

La matière devient transparente au-delà.

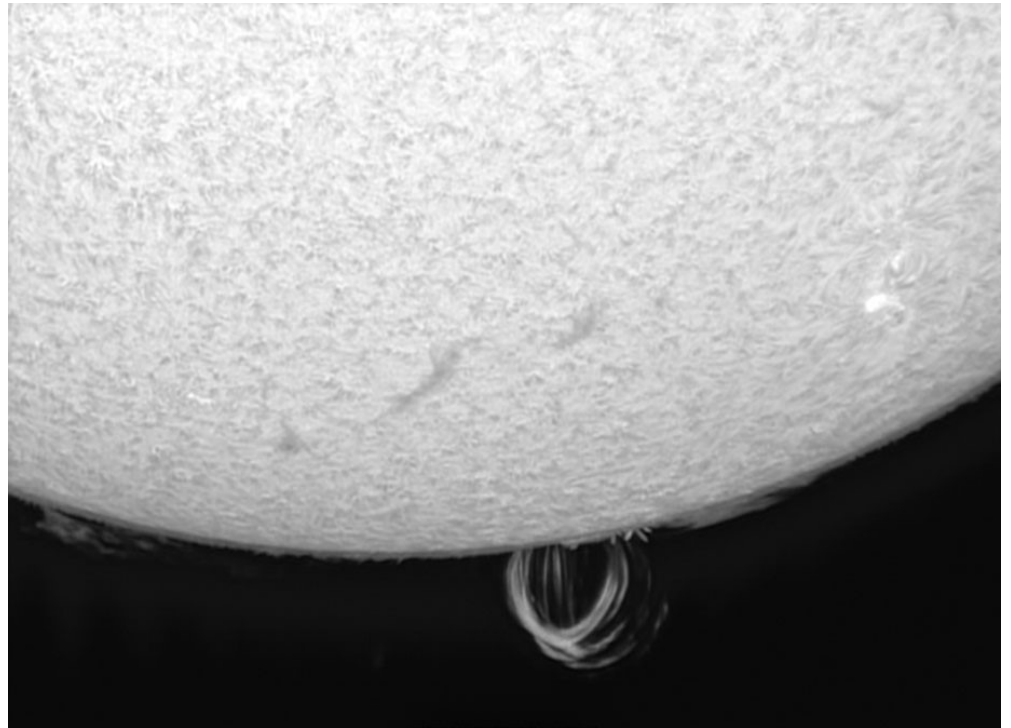
On observe les granules, les taches, les facules...

Température : 5 800 / 6 000 °C.



Composition externe

La chromosphère



Au dessus de la photosphère

Epaisseur : 8 000 km

Composition externe

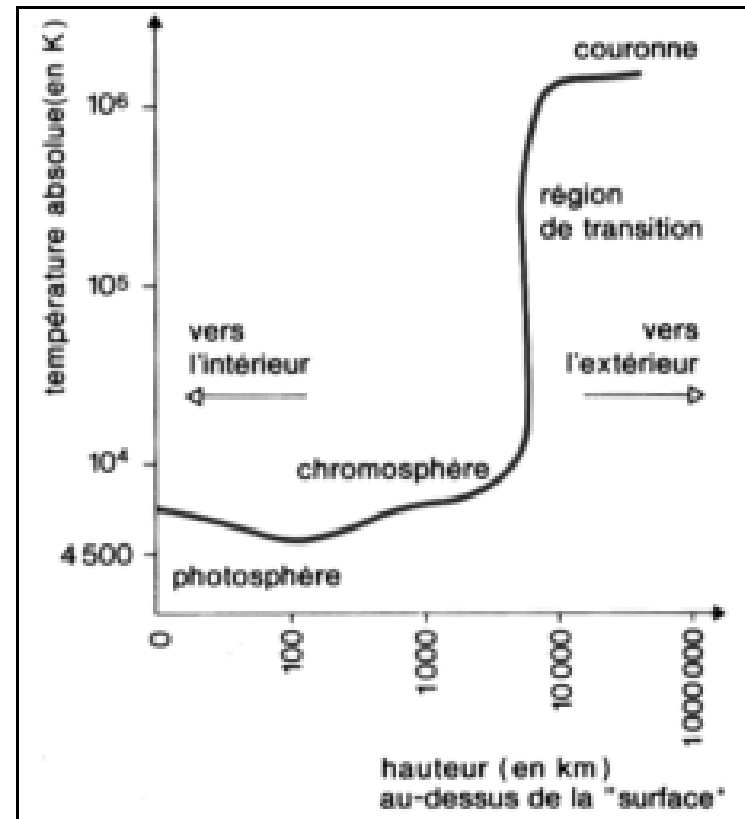
La couronne

La haute atmosphère

Observable lors d'une éclipse ou dans un coronographe

Plasma très dilué

Température : plus d'un million de degrés



LE SOLEIL

Au programme

La naissance du Soleil

Les réactions thermonucléaires

La séquence principale

L'équilibre hydrostatique

Description et caractéristiques du Soleil

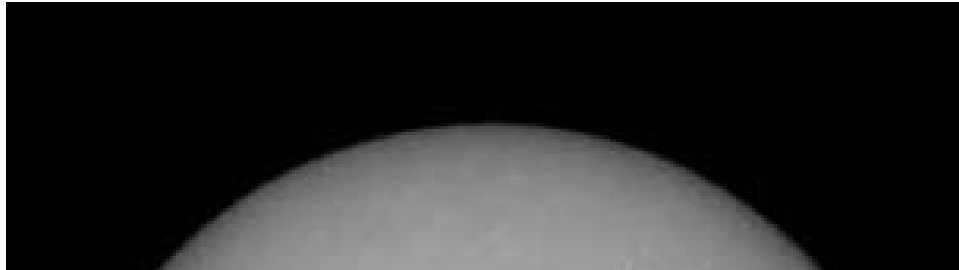
L'observation du Soleil

L'avenir du Soleil

Quoi voir ?

Le bord net

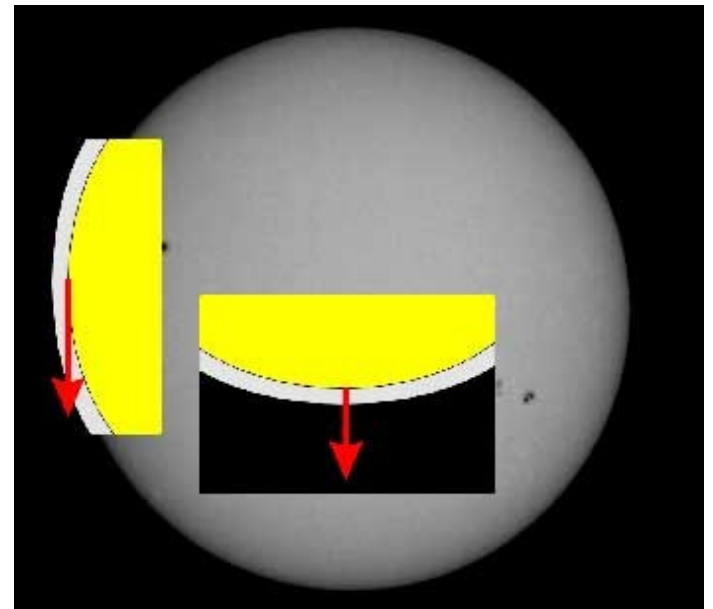
La matière opaque dans la zone convective devient transparente



Quoi voir ?

L'assombrissement des bords

La zone dense d'absorption est plus étroite au centre qu'au bord



Quoi voir ?

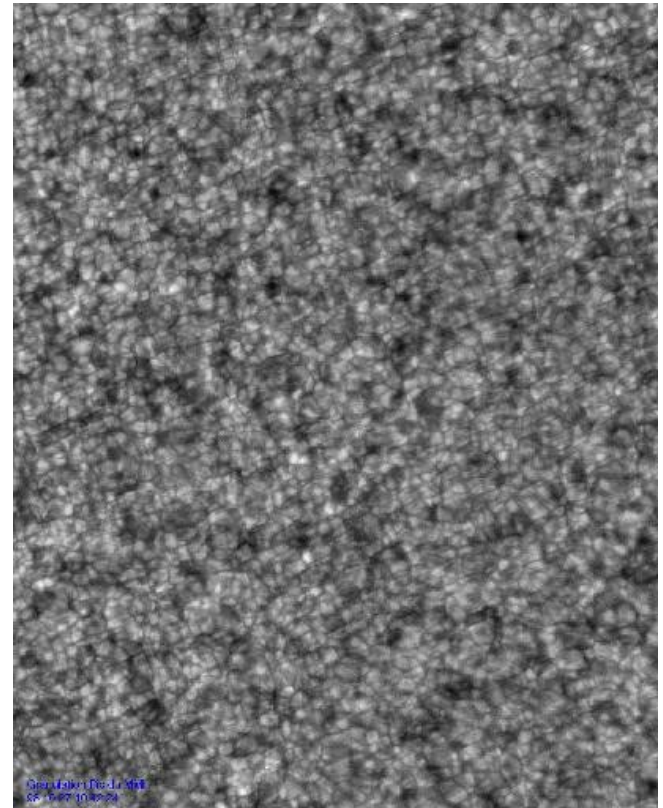
Les granules

Bulles de matière venant de la zone convective

Taille : 1 000 km

Durée de vie : 8 à 15 mn

Température intergranules : 600 à 800 °C de moins



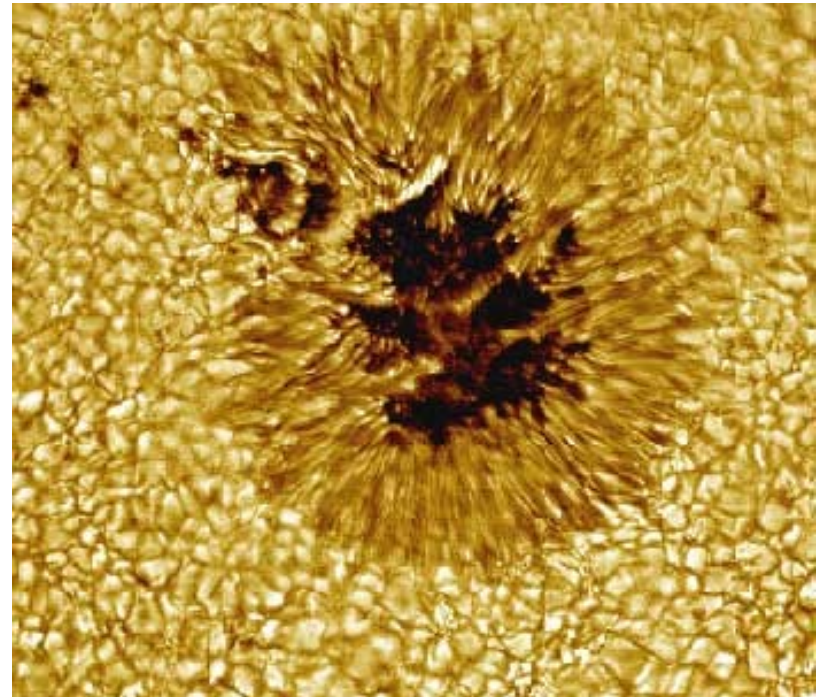
Quoi voir ?

Les taches

Zone enfermée dans une ligne de champ magnétique

Env 800 à 1 000 °C de moins que la surface

Leur nombre varie avec une période de 11 ans

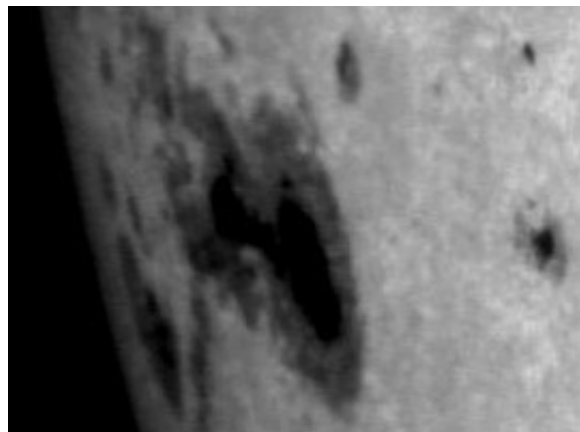
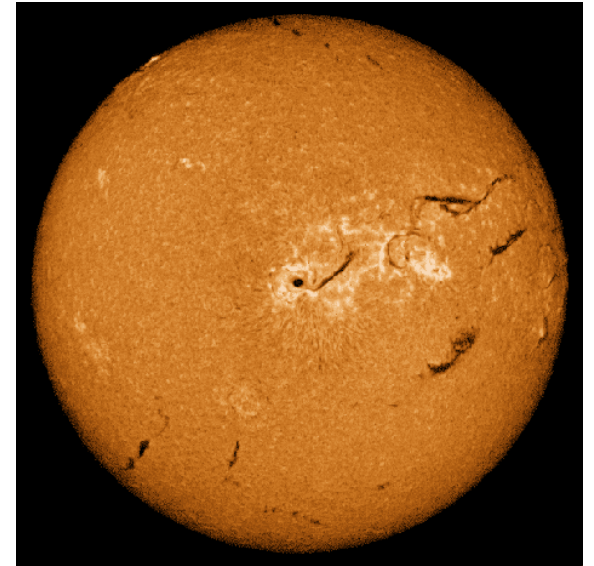


Quoi voir ?

Les facules

Zones brillantes associées
généralement aux taches

Visibles en lumière blanche aux bords
du disque

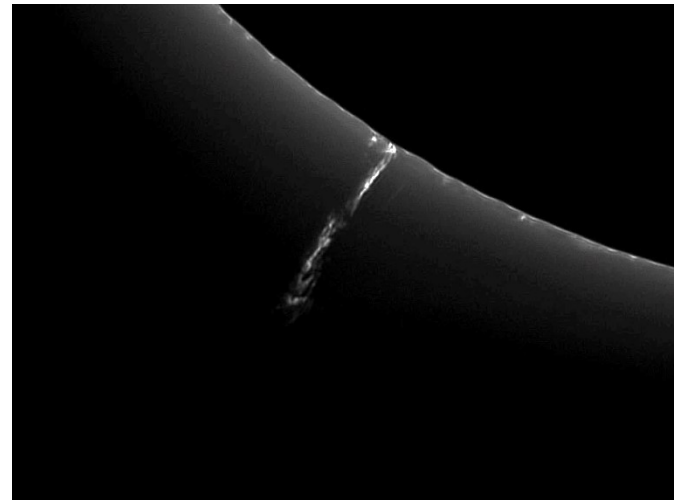
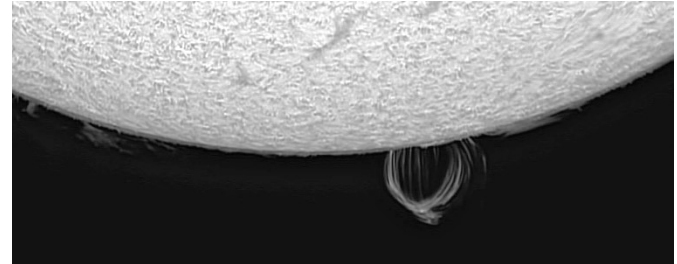


Quoi voir ?

Les protubérances

Arches, jets ou boucles de matière éjectée par les lignes du champ magnétique

Visibles en lumière $H\alpha$

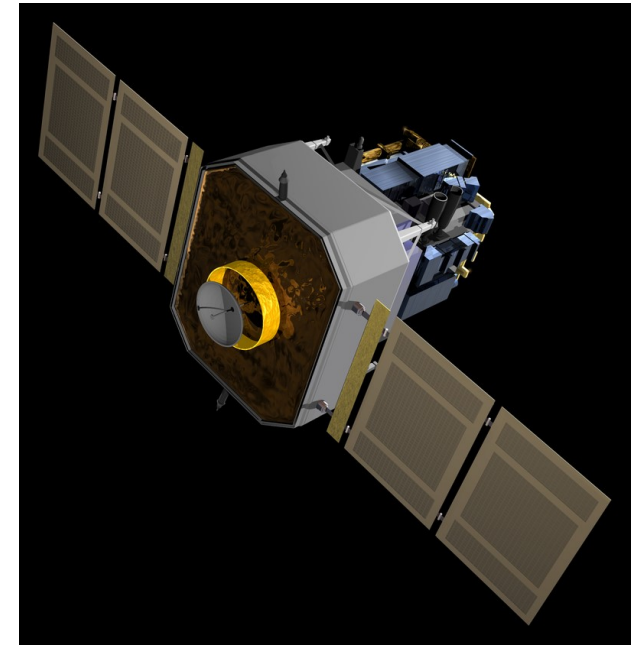


SoHO

Solar and Heliospheric Observatory.

Orbite autour du Soleil, au point de Lagrange L1.

Lancé le 2 décembre 1995.



Comprendre la couronne solaire.

Comment le vent solaire est-il accéléré ?

Quelle est la structure interne du Soleil ?

<https://www.spaceweather.com/swpod2010/14nov10/minusone.gif?PHPSESSID=qj9lt85d3ko6pbag1mk1deqt54>

SDO

Solar Dynamics Observatory.

Orbite géosynchrone à
35 800 km d'altitude.

Lancé le 11 février 2010.



Comprendre le champ magnétique solaire, ses variations, ses sursauts.
Comprendre les éjections de matière, les vents solaires pour les anticiper
(coupure de 1989 au Québec).

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-sonde-parker-solar-probe-bouleverse-enigme-couronne-solaire-67547/>

Parker Solar probe

Lancé le 12 août 2018.

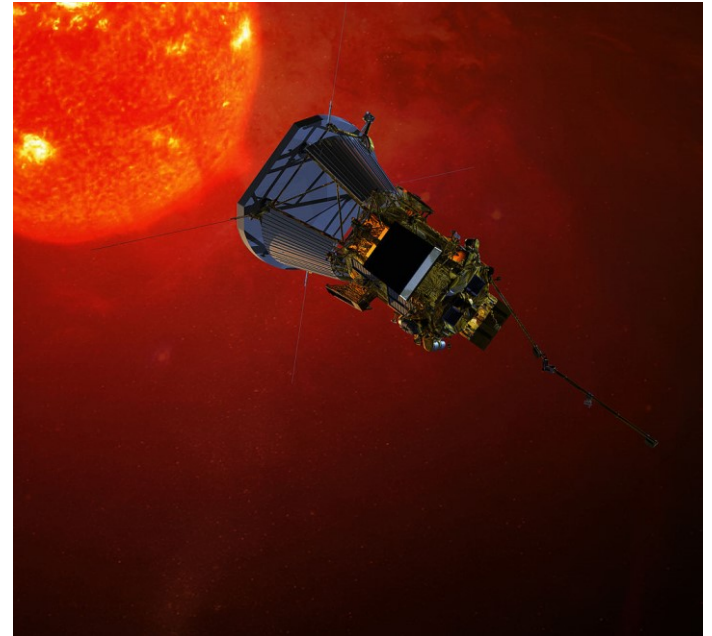
Orbite héliocentrique.

S'approchera à 6 millions de km du Soleil :

- Moins de 10 fois le rayon du Soleil.
- Mercure est à 57 millions de km du Soleil.
- Température de 1 400 °C.

Etude de la couronne solaire.

Comment le vent solaire est-il accéléré ?



Solar orbiter

Lancé le 10 février 2020.
ESA + NASA

Orbite héliocentrique.



S'approchera à 33 millions de km du Soleil :

- Moins de 45 fois le rayon du Soleil.
- Mercure est à 57 millions de km du Soleil.

Etude des régions polaires du Soleil.

DKIST



Télescope terrestre (Daniel K. Inoué Solar Telescope) sur l'île Maui d'Hawaï à 3100 m d'altitude (observatoire d'Haleakala).

Diamètre : 4,2 m (le plus grand télescope solaire du monde).

Mise en service en décembre 2019.
Premières images le 28 janvier 2020.



<https://apod.nasa.gov/apod/ap200203.html>

LE SOLEIL

Au programme

La naissance du Soleil

Les réactions thermonucléaires

La séquence principale

L'équilibre hydrostatique

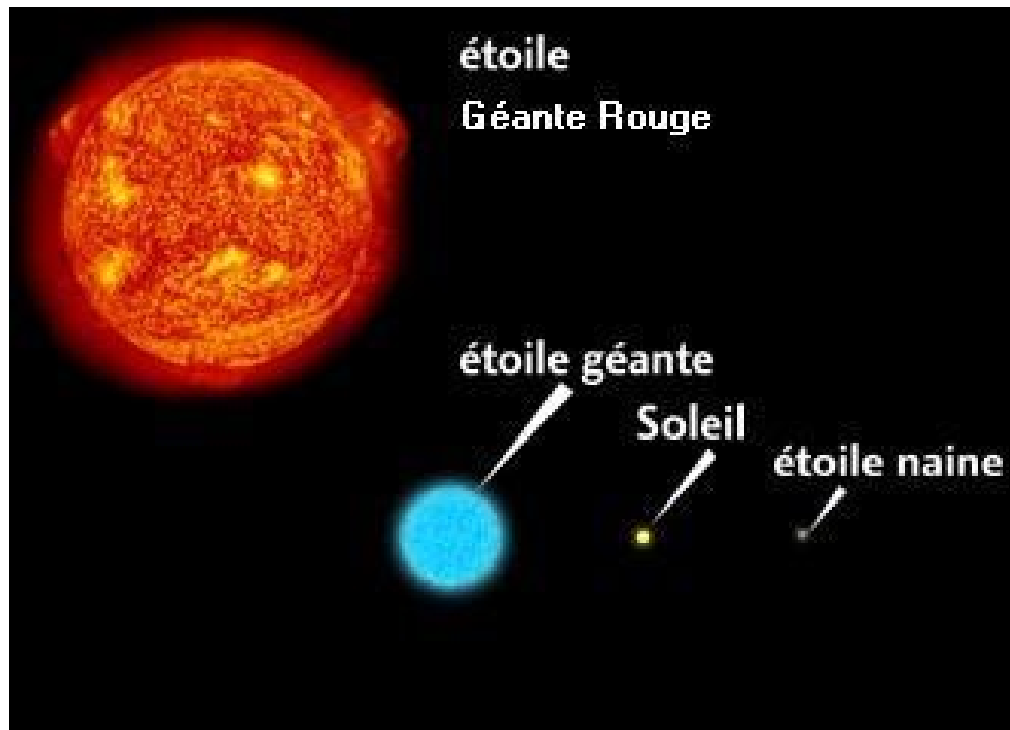
Description et caractéristiques du Soleil

L'observation du Soleil

L'avenir du Soleil

La phase géante rouge

Déséquilibre dû à la fin de la fusion de l'hydrogène (dans environ 5 milliards d'années).



Le diamètre de l'étoile est multiplié par 50 en 2 milliards d'années

La phase nébuleuse planétaire



Cette phase nébuleuse planétaire dure environ 300 000 ans.
L'éjection enrichit le milieu interstellaire d'azote, de carbone, d'oxygène.

La phase naine blanche

Le noyau du Soleil est mis à nu

Sans réaction nucléaire, il se contracte

Densité : 1 t/cm³.

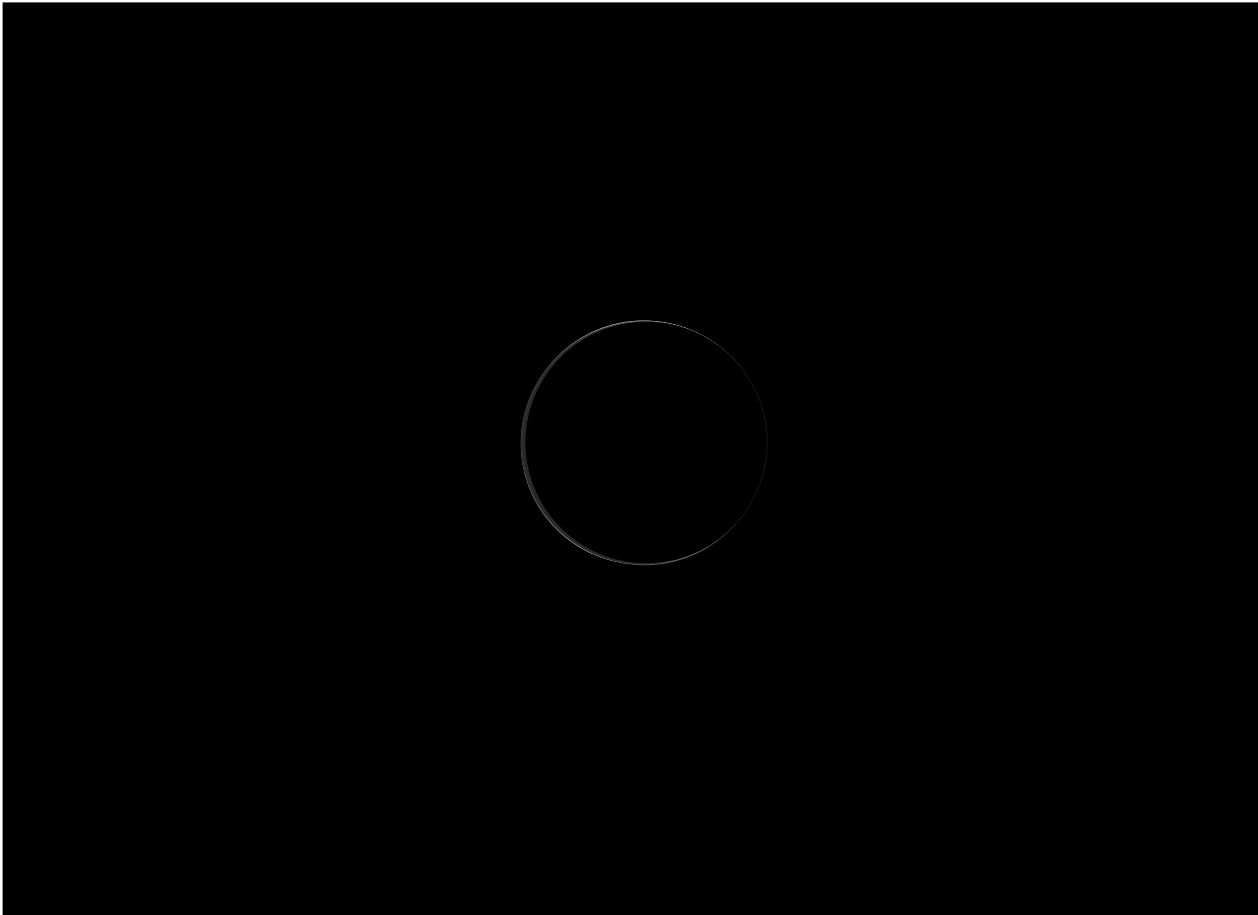
Taille : la Terre

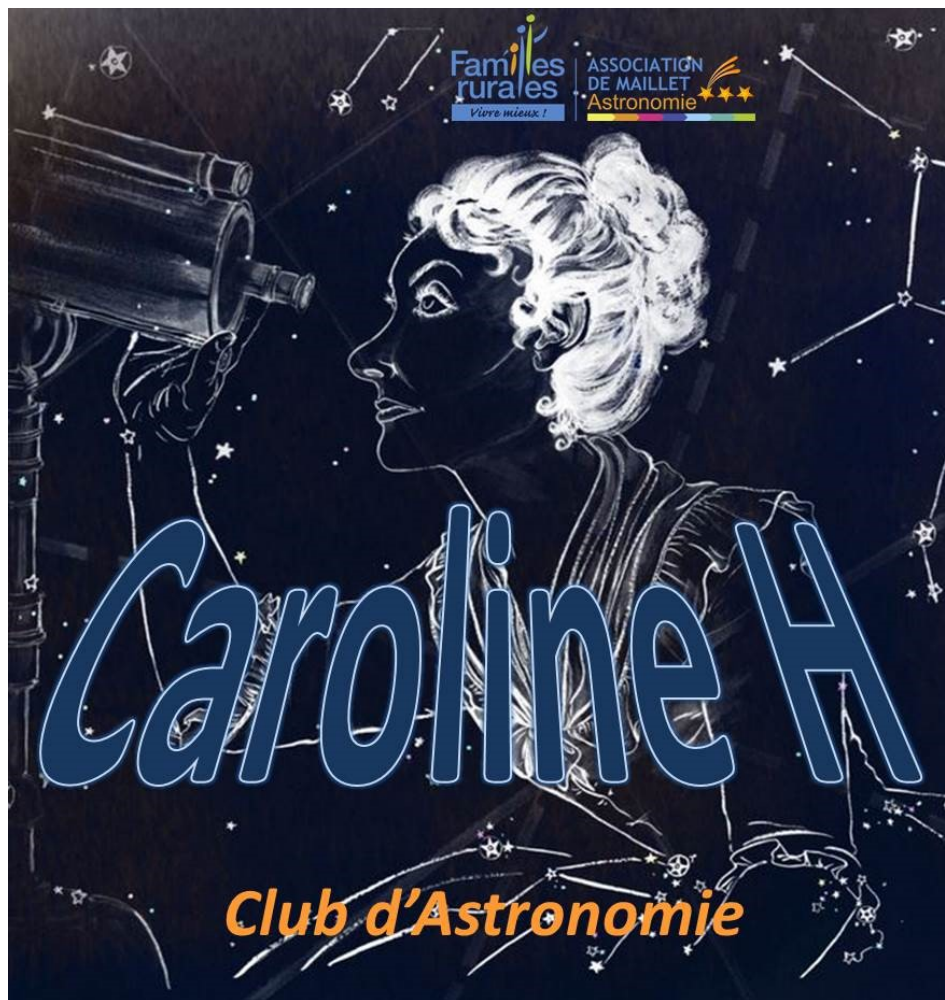
Luminosité : 10 à 100 fois moins que le Soleil actuel

Température de surface : plusieurs dizaines de milliers de degrés

Elle se refroidit progressivement et lentement, jusqu'à s'éteindre...

La naine blanche





www.famillesrurales.org/maillet

Onglet « activités », rubrique « Astronomie »