

# 4 LE SOLEIL

*Pendant combien de temps le Soleil pourra-t-il encore briller ?*



[www.babble.com/travel/25-places-to-see-the-most-beautiful-sunset/](http://www.babble.com/travel/25-places-to-see-the-most-beautiful-sunset/)

**Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.**

## 4.1 LA TAILLE, LA LUMINOSITÉ ET LA TEMPÉRATURE DE SURFACE DU SOLEIL

On peut facilement trouver le rayon du Soleil à partir de sa taille angulaire vue de la Terre et de la distance entre la Terre et le Soleil en utilisant des formules de géométrie. On obtient alors le rayon suivant.

$$R_{\odot} = 6,957 \times 10^8 \text{ m}$$

On peut aussi trouver la luminosité (qui est la puissance en watts) du Soleil à partir de l'intensité de la lumière reçue et de la distance entre la Terre et le Soleil. On obtient la luminosité suivante.

$$1L_{\odot} = 3,828 \times 10^{26} \text{ W}$$

C'est une puissance prodigieuse. Le Soleil rayonne  $3,828 \times 10^{26}$  joules chaque seconde. Si on pouvait capter et emmagasiner toute cette énergie émise en 1 seconde, on aurait de l'énergie pour fournir de l'énergie à tous les habitants de la Terre pendant le prochain million d'années en maintenant notre consommation au niveau actuel.

Finalement, on peut trouver la température de surface à partir de la luminosité et de la taille du Soleil. Pour y arriver, il faut savoir que les étoiles rayonnent parce qu'elles sont des objets chauds. Quand on chauffe un objet, les atomes formant l'objet oscillent de plus en plus. Or, un atome en oscillation accélère continuellement et les particules chargées en accélération émettent du rayonnement électromagnétique. Cela signifie que tous les objets qui n'ont pas une température de 0 K émettent du rayonnement.

Par exemple, cet anneau métallique chauffé à plusieurs centaines de degrés Celsius émet un rayonnement plutôt rouge-orange.

Selon la thermodynamique, la puissance émise par un objet chaud dépend de la température et de la taille de l'objet. Comme on connaît la luminosité et le rayon du Soleil, on peut déduire la température de sa surface.

$$T_{\odot} = 5772 \text{ K} = 5499^{\circ}\text{C}$$



en.wikipedia.org/wiki/Thermal\_radiation

## 4.2 LA ROTATION DU SOLEIL SUR LUI-MÊME

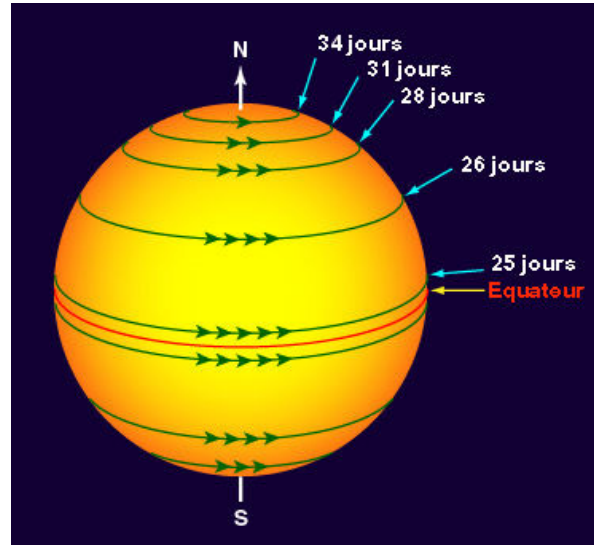
En observant le Soleil sur une longue période, on constate qu'il tourne sur lui-même. Voici un film montrant la rotation du Soleil.

<https://www.youtube.com/watch?v=OQgrY29tSAE>

On mesure alors que la période de rotation du Soleil sur lui-même est de 25,05 jours à l'équateur.

En fait, le Soleil ne tourne pas au même rythme partout. Il tourne plus vite à l'équateur qu'aux pôles. Aux pôles, la période de rotation est de 34,4 jours.

Chose certaine, cela montre que le Soleil n'est pas une boule solide. La période de rotation peut être différente parce que le Soleil est une boule de gaz.

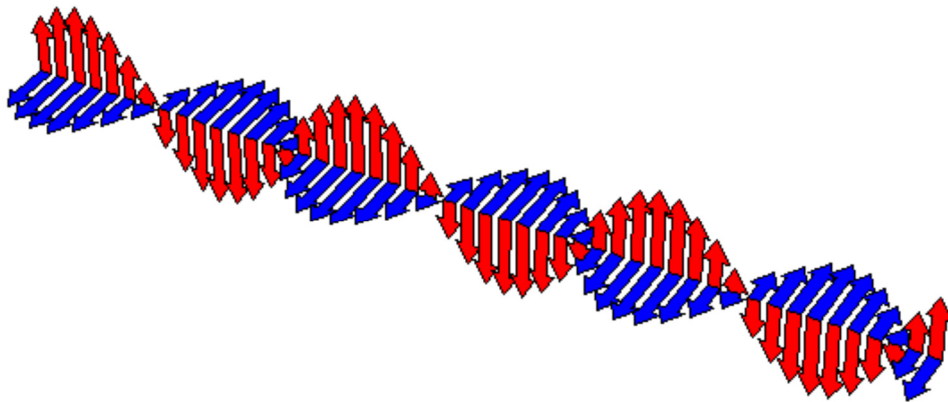


[tpe1s22015.e-monsite.com/pages/les-eruption-solaires-les-emc.html](http://tpe1s22015.e-monsite.com/pages/les-eruption-solaires-les-emc.html)

## 4.3 ÉTUDE DES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT EN PROVENANCE DU SOLEIL

### Le spectre électromagnétique

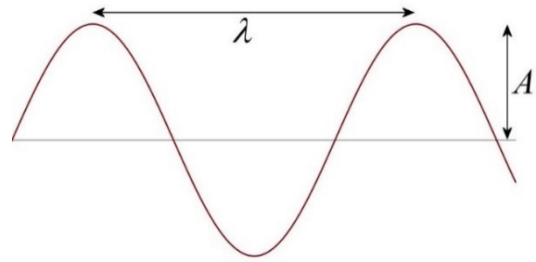
La lumière est une onde électromagnétique, ce qui veut dire que c'est une perturbation des champs électrique et magnétique qui se propage. On peut voir ici une onde électromagnétique qui se propage vers la droite. Vous avez en rouge le champ électrique et en bleu le champ magnétique.



[www.molphys.leidenuniv.nl/monos/smo/index.html?basics/light\\_anim.htm](http://www.molphys.leidenuniv.nl/monos/smo/index.html?basics/light_anim.htm)

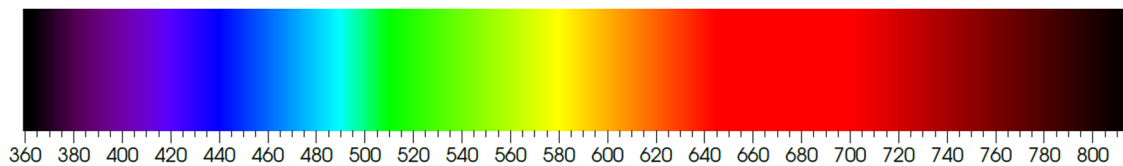
Comme on n'a pas vu les concepts de champ électrique et de champ magnétique, nous n'explorerons pas davantage cette idée. On a seulement besoin de savoir que c'est une onde.

Cette onde a une amplitude ( $A$ ) et une longueur d'onde ( $\lambda$ ). La figure de droite vous montre ce que sont ces quantités.



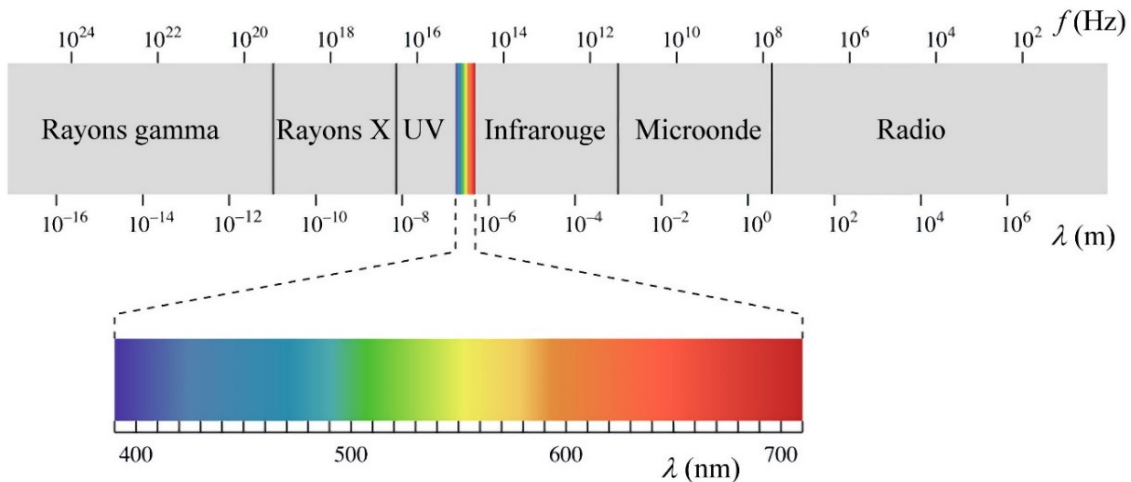
L'amplitude est reliée à l'intensité de l'onde. Plus la lumière a une intensité ( $I$ ) élevée, plus l'amplitude de l'onde est grande.

La longueur d'onde est plutôt reliée à la nature du rayonnement électromagnétique. Par exemple, si la longueur d'onde est de 450 nm, on a de la lumière bleue et si la longueur d'onde est de 650 nm nous avons de la lumière rouge. La figure suivante nous montre la couleur de la lumière en fonction de sa longueur d'onde en nanomètres (les nanomètres sont des milliardièmes de mètre).



On peut superposer des ondes lumineuses. Quand on superpose une quantité égale de toutes les couleurs de la figure, on obtient de la lumière blanche.

Cette séparation en fonction de la longueur d'onde s'appelle un *spectre*. Toutefois, le spectre montré ici n'est qu'une petite partie du spectre de la lumière. Nos yeux ne perçoivent que les ondes qui ont une longueur d'onde entre 400 nm et 750 nm. C'est la partie visible du spectre électromagnétique. En réalité, ce spectre se prolonge de chaque côté et une bonne partie du spectre est composée de lumière que nos yeux ne peuvent pas percevoir. On a classé ces ondes en catégories selon leur longueur d'onde.



[fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum](http://fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum)

## Images du Soleil dans différentes parties du spectre

Dans chaque région du spectre, on peut faire une image qui correspond à ce qu'on pourrait voir si nos yeux étaient sensibles à ces longueurs d'onde. Il y a des choses qu'on peut voir sur ces images qu'on ne peut pas voir avec la lumière visible.

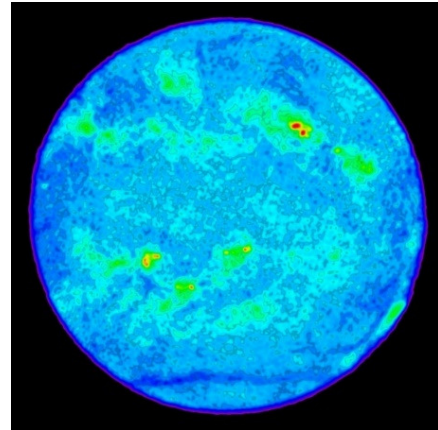
Voyons quelques exemples de ce qu'on observe à différentes longueurs d'onde.

### Les ondes radio et les microondes

Ondes radio :  $\lambda$  de plus de 3 m.  
Microonde :  $\lambda$  entre 1 mm et 3 m.

Voici une image du Soleil en microonde ( $\lambda = 6,5$  cm).

[www.cv.nrao.edu/course/ast534/Tour.html](http://www.cv.nrao.edu/course/ast534/Tour.html)

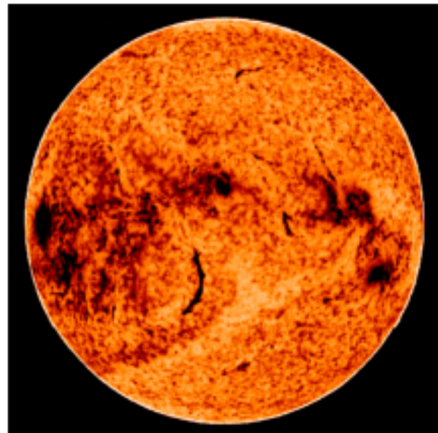


### Les infrarouges

Infrarouges :  $\lambda$  entre 700 nm et 1 mm.

Voici une image du Soleil en infrarouge ( $\lambda = 1083$   $\mu\text{m}$ ).

[solar.physics.montana.edu/yypop/Spotlight/Today/infrared.html](http://solar.physics.montana.edu/yypop/Spotlight/Today/infrared.html)



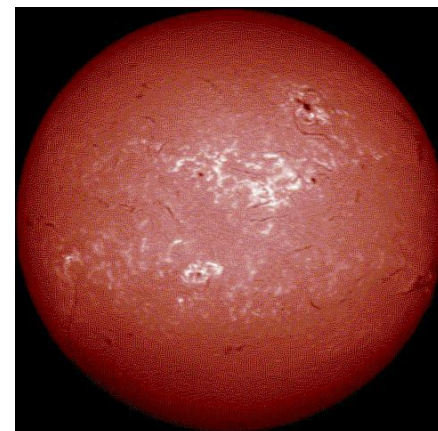
### Le visible

Visible :  $\lambda$  entre 400 nm et 700 nm.

On peut faire des images du Soleil avec des filtres qui ne laisse passer qu'une toute petite partie du spectre visible.

Par exemple, voici une image obtenue avec un filtre qui laisse passer seulement de la lumière ayant une longueur tout près de 656 nm.

[en.wikipedia.org/wiki/Chromosphere#/media/File:HI6563\\_fulldisk.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Chromosphere#/media/File:HI6563_fulldisk.jpg)



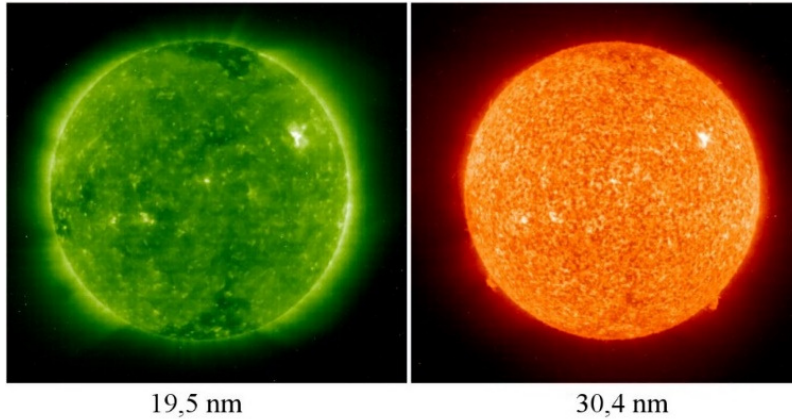


L'ultraviolet

Ultraviolet :  $\lambda$  entre 10 nm et 400 nm.

(Pour les longueurs d'onde inférieures au visible, les limites entre les catégories sont plus floues. Vous verrez que certaines longueurs d'onde sont dans deux catégories.)

Voici deux images du Soleil en ultraviolet.

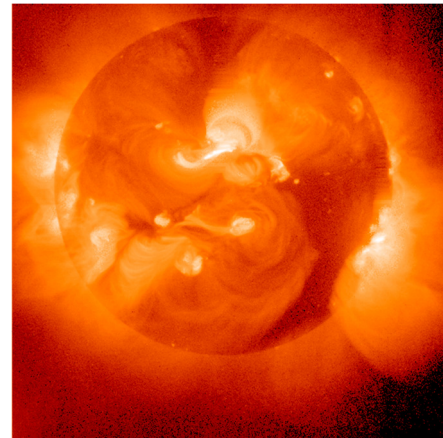


[www.thesuntoday.org/the-sun-now/](http://www.thesuntoday.org/the-sun-now/)

Les rayons X

Rayons X :  $\lambda$  entre 0,001 nm et 100 nm.

Voici une image du Soleil en rayons X ( $\lambda = 1,2$  nm).



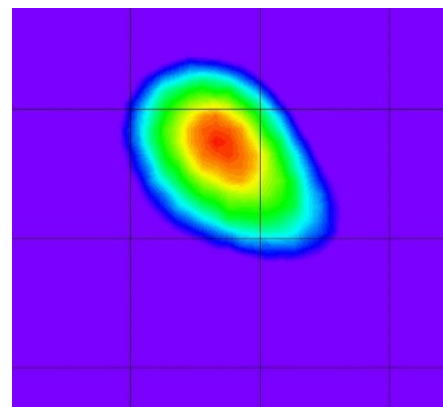
[solar.physics.montana.edu/ypop/ProjectionRoom/latest\\_SXT.html](http://solar.physics.montana.edu/ypop/ProjectionRoom/latest_SXT.html)

Les rayons gamma

Rayons gamma :  $\lambda$  inférieure à 0,1 nm.

Voici une image du Soleil en rayon gamma.

[commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamma\\_sun.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamma_sun.jpg)

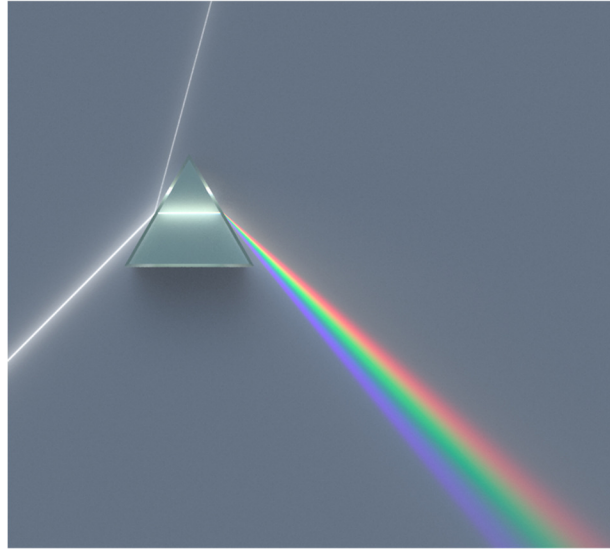


## La spectroscopie

On peut étudier la lumière reçue en décomposant la lumière. Par exemple, on peut décomposer la lumière en la faisant passer dans un prisme.

En séparant ainsi la lumière, on obtient le *spectre de la lumière*. L'étude de ce spectre est la *spectroscopie*. Sur l'image, on ne voit que la lumière visible, mais on peut séparer ainsi toutes les composantes du spectre électromagnétique.

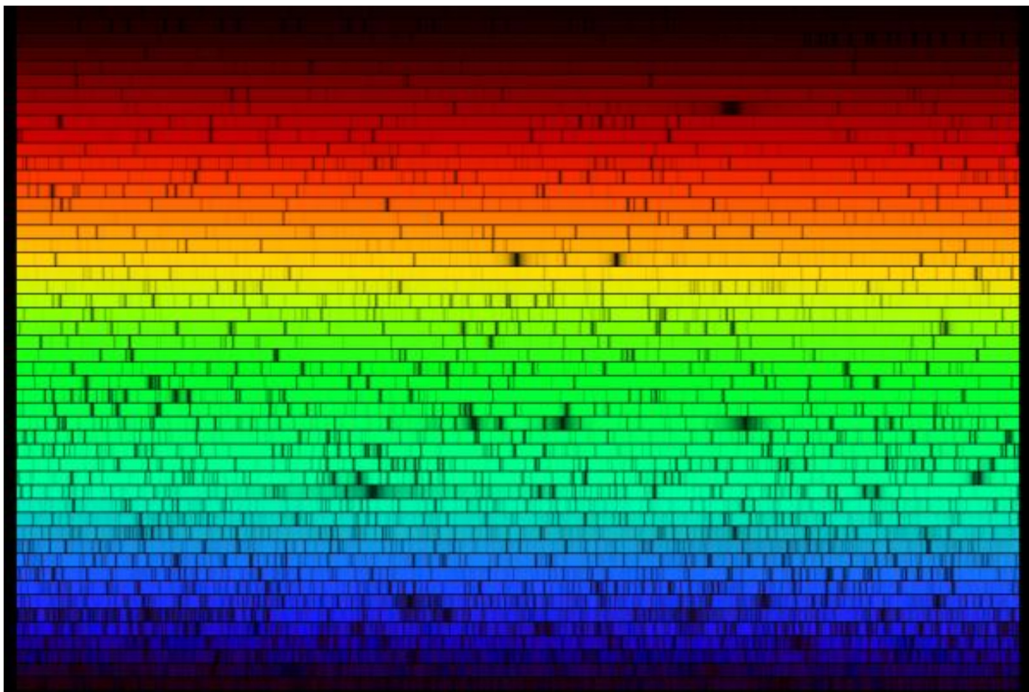
La spectroscopie permet, entre autres, déterminer la composition du Soleil.



## 4.4 LA COMPOSITION DU SOLEIL

### Les raies d'absorption dans le spectre du Soleil

Pour comprendre comment on détermine la composition du Soleil, examinons le spectre de la lumière provenant du Soleil. On remarque qu'il y a des petites régions où il n'y a pas de lumière. Ces régions où il n'y a pas de lumière sont appelées les *raies d'absorption*.



[spiff.rit.edu/classes/phys230/lectures/spectrographs/spectrographs.html](http://spiff.rit.edu/classes/phys230/lectures/spectrographs/spectrographs.html)

William Wollaston a été le premier, en 1802, à se rendre compte qu'il y a des raies d'absorption dans le spectre du Soleil. Dès 1814, Joseph Fraunhofer avait catalogué 475 de ces raies d'absorption dans le spectre solaire.

C'est avec la position de ces raies d'absorption que l'on peut déterminer la composition de Soleil.

## Spectres d'émission et d'absorption

### Le spectre d'émission

Quand on chauffe (disons à 3000 K) un gaz peu dense, il émet de la lumière. Cette lumière est cependant un peu particulière. Il n'y a que certaines longueurs d'onde très précises qui sont émises. Quand on fait le spectre de ce gaz, il n'y a que quelques lignes dans le spectre, plutôt qu'un spectre continu. Ces lignes sont les *raies spectrales*. On a alors un spectre d'émission.

Par exemple, voici le spectre d'émission du krypton.



astrodave.name/

En fait, chaque élément a un spectre particulier. Les longueurs d'onde émises par chacun des éléments (évidemment sous forme de gaz) sont différentes.

Hélium



Argon

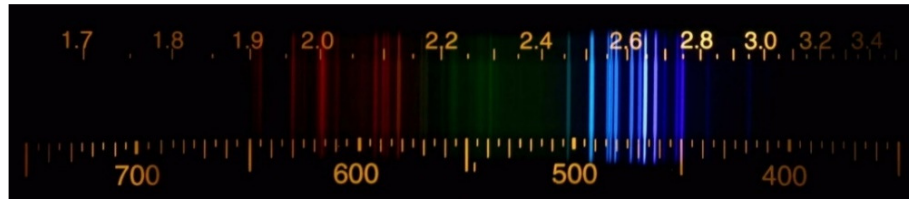




Mercure



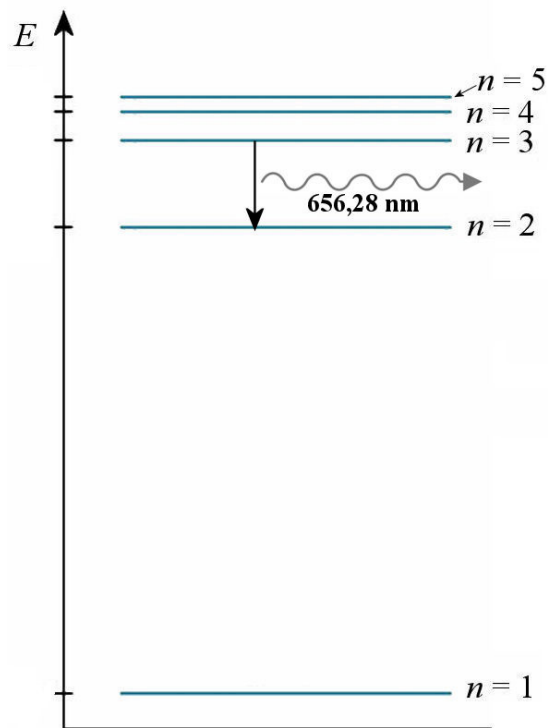
Xénon



astrodave.name/

Ces raies d'émission permettent de savoir à quels gaz on a affaire. Si on a un gaz formé de plusieurs éléments, on peut trouver la composition du gaz en le chauffant et en déterminant la longueur d'onde des raies d'émission. Si on a toutes les raies d'émission de l'hélium dans notre spectre, alors il y a de l'hélium dans notre gaz.

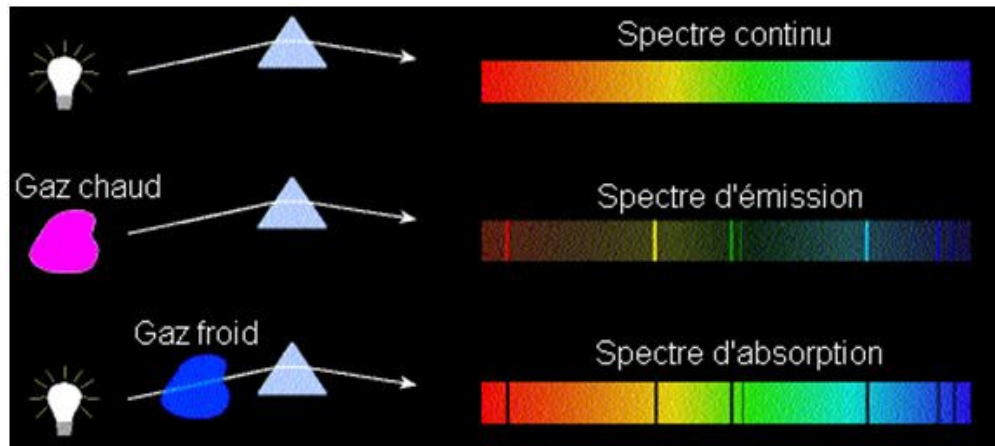
Ces raies sont produites quand un électron passe d'un niveau d'énergie à un autre niveau d'énergie plus bas dans l'atome. Quand l'électron passe ainsi d'un niveau à l'autre, l'énergie perdue par l'électron est émise sous forme de photon. Le photon a alors une énergie qui correspond à la différence d'énergie entre les niveaux. Comme l'énergie des photons est liée à la longueur d'onde de la lumière, l'atome émet alors une couleur très spécifique quand l'électron passe d'un niveau à l'autre. Les énergies des niveaux étant différentes pour chaque atome, la longueur d'onde de la lumière émise est différente pour chaque transition de chaque atome. Par exemple, l'atome d'hydrogène émet de la lumière rouge à 656,28 nm quand un électron passe du niveau 3 au niveau 2 (figure de droite). Le même atome émet de la lumière à 121,57 nm (c'est de l'ultraviolet) quand l'électron passe du niveau 2 au niveau 1. Pour un autre atome, les longueurs d'onde sont différentes. Par exemple, pour l'hélium, la lumière émise a une longueur d'onde de 501,6 nm quand un électron passe du niveau 3 au niveau 2.



Toutefois, on n'a pas de spectre d'émission avec le Soleil, on a un spectre d'absorption.

Le spectre d'absorption

Si on fait passer de la lumière blanche à travers un gaz peu dense, mais froid, on obtient cette fois-ci un spectre d'absorption. Le gaz absorbe les mêmes longueurs d'onde que celles émises par le gaz quand il est chaud.



[physicscentral.com/experiment/askaphysicist/physics-answer.cfm?uid=20130604091958](http://physicscentral.com/experiment/askaphysicist/physics-answer.cfm?uid=20130604091958)

La méthode mentionnée précédemment peut donc s'appliquer aussi au spectre d'absorption. Si on a toutes les raies d'absorption de l'hélium dans notre spectre, alors le gaz contient de l'hélium.

Ainsi, chaque ligne noire du spectre du Soleil est associée à un élément. Cela ne veut pas dire qu'il y a autant d'éléments différents qu'il y a de raies d'absorption puisque chaque élément est responsable de plusieurs raies. Par exemple, le fer à lui seul est à l'origine de 70 raies spectrales dans le spectre solaire.

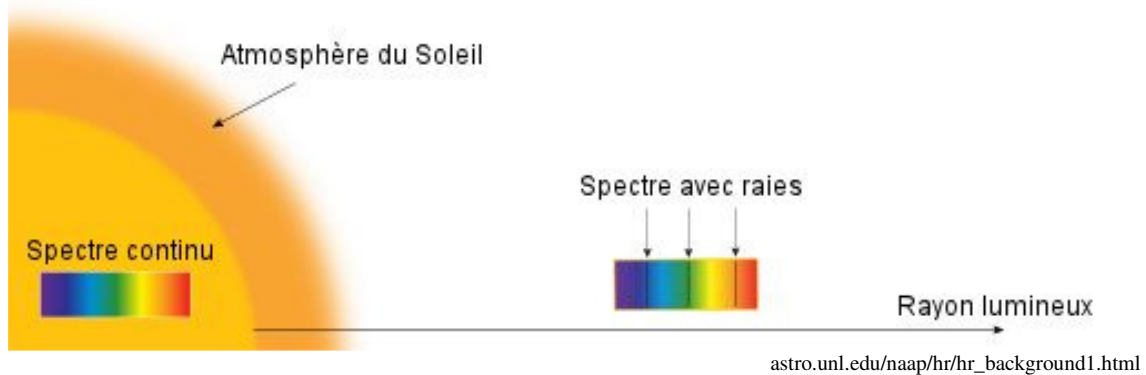
Il y a une raie d'absorption quand un électron absorbe un photon. Cette énergie gagnée par l'électron lui permet alors de monter de niveau d'énergie dans l'atome. Comme il lui faut une énergie très précise pour passer d'un niveau à l'autre, l'électron absorbe seulement un photon ayant une énergie très précise (ce qui correspond à une longueur d'onde très spécifique) selon l'atome et les niveaux d'énergie initial et final.

## Pourquoi obtient-on un spectre d'absorption avec le Soleil ?

La surface du Soleil étant à 5499 °C K, on pourrait s'attendre à ce qu'on obtienne un spectre d'émission. Pourquoi obtient-on un spectre d'absorption alors ?

En fait, la densité du gaz est trop élevée dans le Soleil. Il y a donc beaucoup d'interaction entre la lumière et les atomes et cela fait complètement disparaître les raies d'émission. On obtient alors un spectre continu, sans raies d'émission ou d'absorption. La lumière émise par le Soleil est donc composée de toutes les longueurs d'onde (elle n'est toutefois pas parfaitement blanche parce qu'il n'y a pas nécessairement la même quantité de lumière de chaque couleur.).

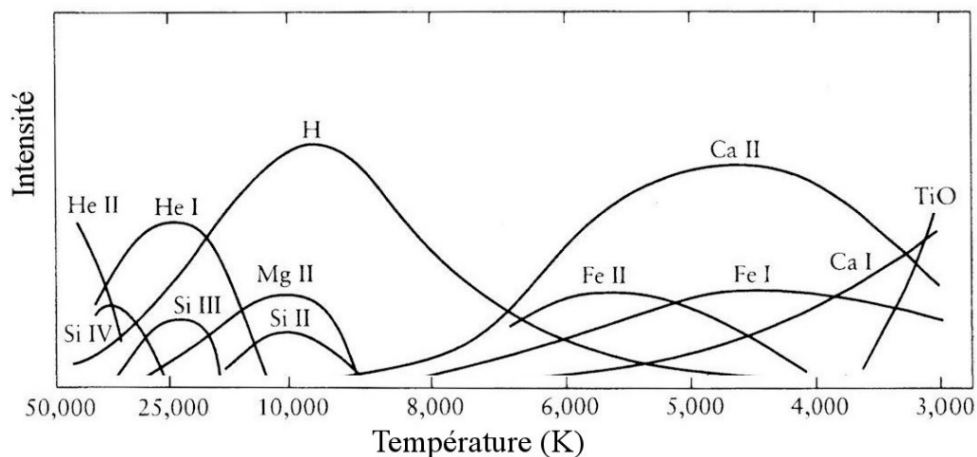
Mais le Soleil ne se termine pas à la surface, il y a du gaz au-dessus de la surface qui forme une atmosphère. C'est quand la lumière émise à la surface du Soleil traverse la couche de gaz peu dense un peu au-dessus de la surface qu'il se forme des raies d'absorption.



Le spectre montre donc les éléments présents dans l'atmosphère. Les modèles prévoient cependant que cette couche a une composition identique à celle du Soleil, du moins pour la partie près de la surface.

## L'intensité des raies spectrales

On se doute bien que l'intensité des raies dépend de la proportion d'éléments dans l'étoile. S'il y a beaucoup de fer, on s'attend à des raies d'absorption du fer très prononcées. Toutefois, l'intensité relative des raies dépend aussi de la température du gaz. Par exemple, l'intensité relative des raies d'hydrogène augmente quand on augmente la température pour atteindre un maximum à près de 9000 K. Au-delà de cette température, l'intensité des raies d'hydrogène diminue. Le graphique suivant montre l'intensité des raies de différents éléments selon la température. Remarquez le maximum d'intensité à 9000 K pour l'hydrogène.



[www.astro.bas.bg/~petrov/hawley99.html](http://www.astro.bas.bg/~petrov/hawley99.html)

(Note : Le I après le nom de l'élément indique que l'atome n'est pas ionisé et le II indique que l'atome est ionisé 1 fois.)

Expliquons cette variation pour l'hydrogène pour illustrer pourquoi il y a de telles variations avec la température. À basse température, il n'y a pas beaucoup de photons qui ont assez d'énergie pour faire monter l'électron de niveaux dans l'hydrogène et la raie d'absorption n'est pas très intense. À mesure que la température augmente, il y a de plus en plus de photons qui ont une énergie suffisante et la raie devient de plus en plus prononcée. Au-delà de 9000 K, le pourcentage d'hydrogène ionisé (atomes d'hydrogène qui ont perdu leur électron) devient très important. Comme un atome d'hydrogène ionisé n'a plus d'électrons, il ne peut plus y avoir de raie d'absorption. On voit alors disparaître la raie d'absorption à mesure que la température augmente parce qu'il y a de moins en moins d'hydrogène non ionisé.

Ainsi, pour déterminer la proportion des éléments dans le Soleil, il faut tenir compte de l'intensité des raies, mais aussi de la température de surface.

## La composition du Soleil

La position des raies spectrales et leurs intensités nous permettent de connaître la quantité de chaque élément présent dans le Soleil. Voici ce qu'on obtient, en ordre d'importance.

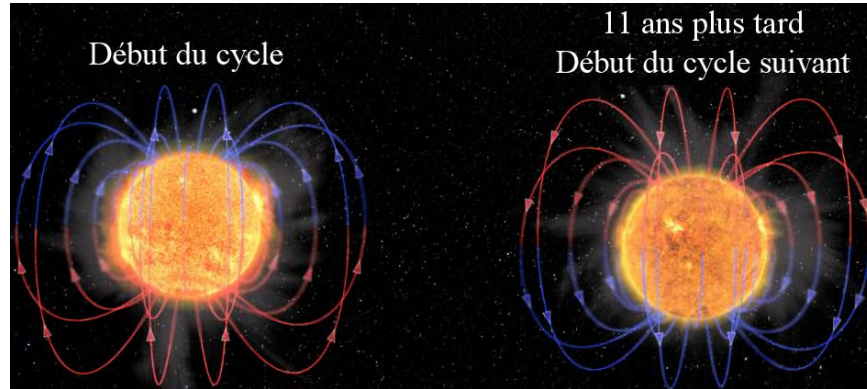
Élément	Abondance (% des atomes)	Abondance (% de la masse)
Hydrogène	91,2	71,0
Hélium	8,7	27,1
Oxygène	0,078	0,97
Carbone	0,043	0,40
Azote	0,0088	0,096
Silicium	0,0045	0,099
Magnésium	0,0038	0,076
Néon	0,0035	0,058
Fer	0,0030	0,14
Soufre	0,0015	0,040

Ce ne sont pas les seuls éléments présents puisque 67 éléments au total ont été identifiés dans le spectre solaire. Même si les proportions sont assez faibles pour beaucoup d'éléments, cela représente quand même beaucoup de matière. Ainsi, il ne semble pas y avoir beaucoup de magnésium dans le Soleil, mais cette proportion représente quand même  $1,5 \times 10^{27}$  kg, soit 250 fois la masse de la Terre...

Petite note historique intéressante : Le 18 août 1866, Jules Janssen découvre, dans le spectre du Soleil, des raies d'absorption qui ne correspondaient à aucun élément connu. Il se rend compte assez vite qu'il a affaire à un élément auparavant inconnu, l'hélium (nom proposé par le Britannique Lockyer, qui vient d'*hélios*, qui veut dire Soleil en grec).

## 4.5 LE CHAMP MAGNÉTIQUE DU SOLEIL

Le Soleil possède un champ magnétique très puissant. Toutefois, on remarque que ce champ s'inverse tous les 11 ans (en fait,  $11 \pm 4$  ans).



[insider.si.edu/2017/07/3d-simulations-reveals-sun-flips-magnetic-field-every-11-years/](http://insider.si.edu/2017/07/3d-simulations-reveals-sun-flips-magnetic-field-every-11-years/)

En fait, le processus est très complexe. Voici une animation qui montre les variations du champ magnétique entre janvier 1997 et décembre 2013. On voit très bien les inversions de champ.

<https://www.youtube.com/watch?v=UB17nhzVaSg>

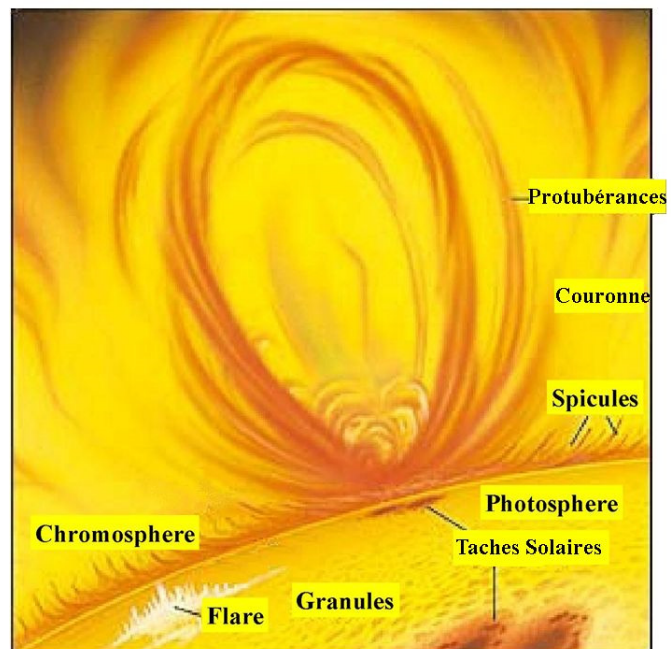
(On aura plus de détails sur l'origine de ces variations au chapitre suivant.)

## 4.6 LA SURFACE DU SOLEIL

### Les structures présentes à la surface du Soleil

Voici tous les éléments qu'on peut observer à la surface du Soleil.

Examinons donc ces différents éléments sur cette surface à  $5499\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

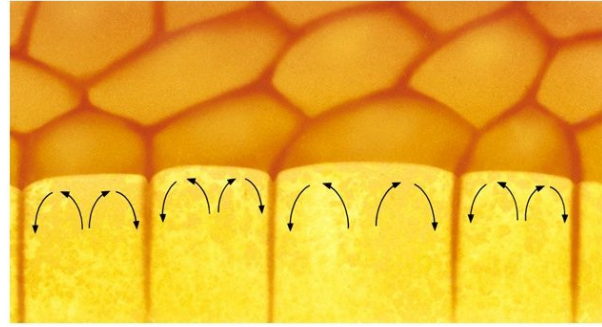


[www.pas.rochester.edu/~afrank/A105/LectureVII/LectureVII.html](http://www.pas.rochester.edu/~afrank/A105/LectureVII/LectureVII.html)

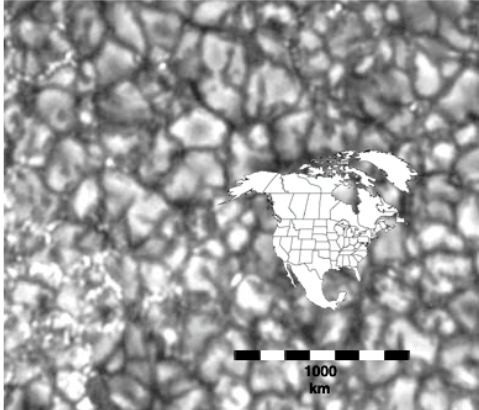


## Les granules

Quand on regarde la surface du Soleil, on voit de vastes tourbillons de matière à la surface qui donne l'impression que la surface est granuleuse. On a donc donné le nom de *granules* à ces structures.



[www.earthsci.org/fossils/space/sun/sun.html](http://www.earthsci.org/fossils/space/sun/sun.html)



[en.wikipedia.org/wiki/Convection\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Convection_cell)

Sur l'image de gauche, on a superposé l'Amérique du Nord aux granules pour bien apprécier la taille de granules. Typiquement, les granules ont un diamètre de 1500 km.

Le vidéo suivant vous montre comment les granules se modifient avec la convection sur une période de deux heures.

<http://www.youtube.com/watch?v=O-UjQwTfjGg>

Ces observations montrent clairement qu'il y a de vastes tourbillons de matière sous la surface, donc

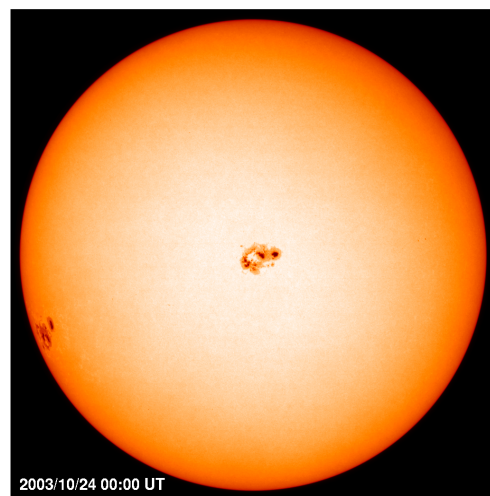
qu'il y a une zone de convection juste sous la surface du Soleil.

## Les taches solaires

### Des régions un peu plus froides

On remarque qu'il y a parfois des taches noires à la surface du Soleil. Ce sont les taches solaires.

À l'œil nu, c'est impossible de voir les taches en plein jour, mais c'est possible d'en voir au lever ou au coucher du Soleil si elles sont grosses. C'est ainsi que des astronomes chinois ont pu en observer il y a environ 2000 ans. Avec l'arrivée des télescopes en 1608, on pouvait plus facilement les observer. (On ne regardait pas directement le Soleil au télescope, cela aurait brûlé l'œil de l'observateur. On projetait plutôt l'image sur un écran et on observait l'image du Soleil sur l'écran.) Parmi les premiers observateurs, on retrouve Galilée, Christian Scheiner, Johan Fabricius et Thomas Harriott.



[www.urban-astronomer.com/articles/2012/solar-flares](http://www.urban-astronomer.com/articles/2012/solar-flares)

C'est grâce aux taches qu'on a pu mesurer la période de rotation du Soleil et constater qu'elle variait avec la latitude.

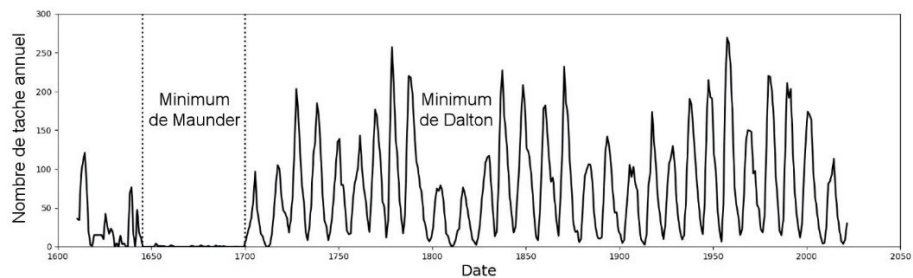
Typiquement, ces taches ont un diamètre de 25 000 km, soit deux fois le diamètre de la Terre, et ont une durée de vie d'une cinquantaine de jours.

Précisons que ces taches ne sont pas vraiment noires. Elles sont même très lumineuses. Ce sont des régions où la surface du Soleil est un peu plus froide. La température de la surface du Soleil est à 5772 K alors qu'elle descend à environ 4000 K dans les taches solaires. Selon la loi d'émission de la lumière par des objets chauds, cela veut dire que les taches sont 4 fois moins lumineuses par unité de surface que le reste de la surface du Soleil. Si elle semble noire, c'est uniquement par effet de contraste avec le reste de la surface du Soleil. Si on pouvait prendre uniquement une tache solaire, elle brillerait autant que la pleine Lune.

Les taches ayant une luminosité par unité de surface plus petite que le reste de la surface du Soleil, la luminosité du Soleil diminue quand il y a beaucoup de taches solaires. Toutefois, elle diminue d'à peine 0,1 % dans le pire des cas. Il semble toutefois que la luminosité des certaines étoiles pourrait diminuer de presque 25 % quand il y a beaucoup de taches sur ces étoiles.

### Le cycle solaire

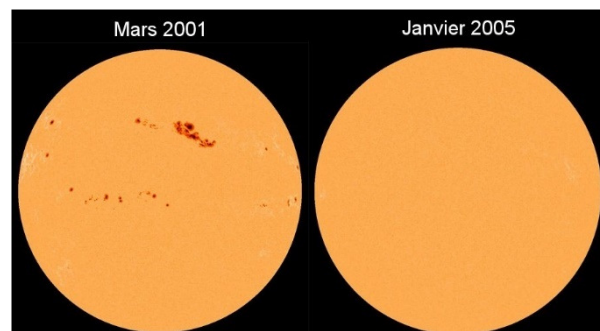
Le nombre de taches varie avec le temps. Voici un graphique donnant le nombre de taches sur le Soleil en fonction du temps.



[www.solarcyclescience.com/solarcycle.html](http://www.solarcyclescience.com/solarcycle.html)

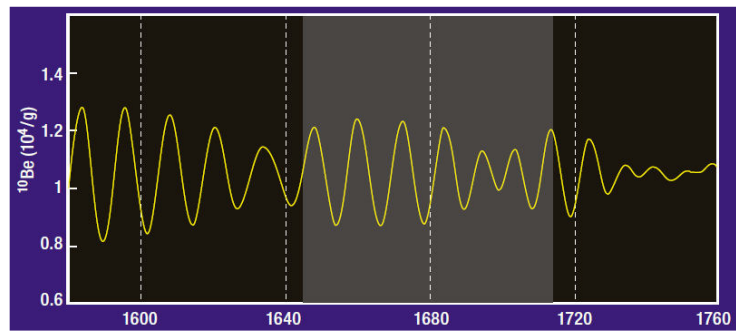
Le nombre de taches varie en suivant le cycle de 11 ans des inversions du champ magnétique. En fait, le champ s'inverse quand on atteint le nombre maximal de taches.

L'image de droite vous montre l'allure du Soleil lors du maximum de 2001 et en 2005, près du minimum de 2008.



[spark.ucar.edu/sunspot-cycle](http://spark.ucar.edu/sunspot-cycle)

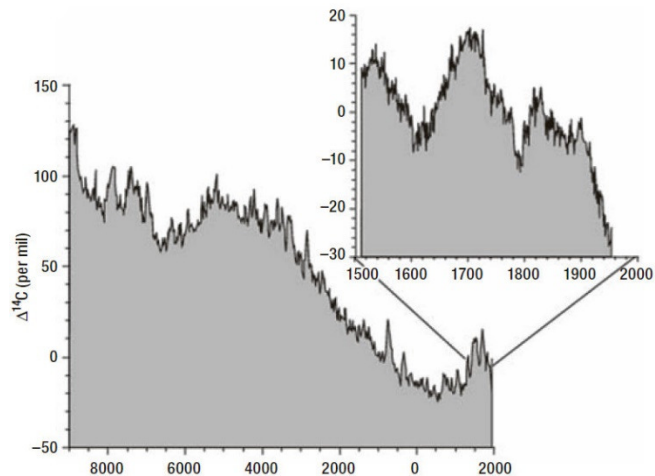
On remarque que le nombre maximum de taches pour chaque cycle est très variable. On constate même qu'il n'y avait pratiquement pas de taches entre 1645 et 1705. Ce minimum, appelé minimum de Maunder, n'est pas dû à un manque d'observations. Beaucoup d'astronomes observaient le Soleil à cette époque et il n'y avait vraiment pas de taches. Même s'il n'y avait pas beaucoup d'activités à la surface du Soleil pendant ce minimum, on sait que le cycle solaire ne s'est pas arrêté durant cette période. On a vu au chapitre 1 que le champ magnétique solaire a une influence sur le flux de rayons cosmiques qui atteint la Terre et que ces rayons cosmiques sont à l'origine de certaines réactions en haute atmosphère, comme la production de béryllium 10 et de carbone 14. Comme on peut déterminer la concentration de ces éléments dans l'atmosphère dans le passé, on peut déduire leur taux de production. Le graphique de droite montre ce taux pour le béryllium 10.



[academic.oup.com/astrogeo/article/45/4/4.7/1746086](http://academic.oup.com/astrogeo/article/45/4/4.7/1746086)

Ce graphique indique clairement que le taux de production de béryllium 10 a continué de varier pendant le minimum de Maunder en suivant un cycle d'environ 11 ans, ce qui indique que le cycle solaire ne s'est pas interrompu pendant cette période.

Le graphique du taux de production du carbone 14 (à droite) montre les variations du cycle solaire sur une plus longue période. Les minimums d'activité solaire correspondent à une hausse de la production du carbone 14. On voit très bien le minimum de Maunder qui correspond à un maximum de production du carbone 14 vers l'an 1700.



[academic.oup.com/astrogeo/article/45/4/4.7/1746086](http://academic.oup.com/astrogeo/article/45/4/4.7/1746086)

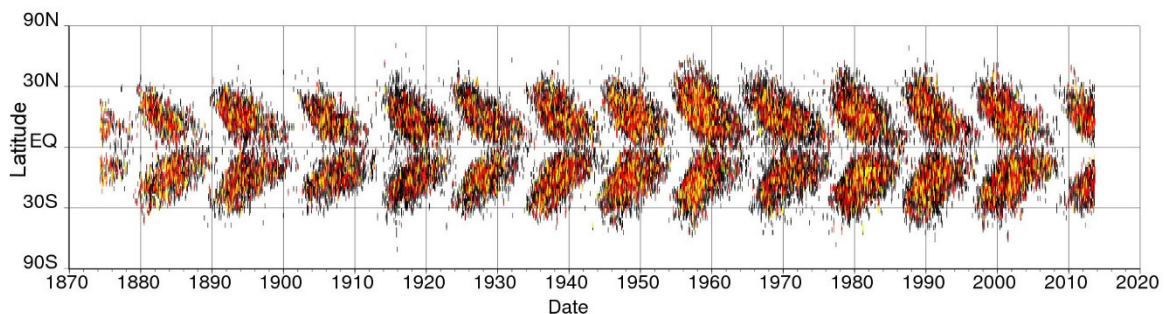
On ne sait pas encore avec certitude si ces variations sont cycliques ou non. Il se pourrait qu'il y ait des cycles de longue durée dans le cycle solaire. Parmi ces cycles, il y aurait le cycle de Gleisberg (identifié en 1862) qui a une période d'environ 88 ans, le cycle de Suess-DeVries qui a une période d'environ 210 ans et le cycle de Hallstatt qui a une période de 2400 ans. Ce dernier cycle aurait atteint son minimum il y a environ 400 ans, au moment où se produisait le minimum de Maunder. Il pourrait aussi y avoir un cycle de 6000 ans.

Notez qu'il y a peut-être une corrélation entre le climat terrestre et l'activité solaire. Lors du minimum de Maunder, la température de la Terre était environ  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  plus basse que

maintenant (période appelée le *petit âge glaciaire*). Quand l'activité solaire était particulièrement intense entre les années 1100 et 1250, le climat était plus chaud. On cherche encore à déterminer s'il y a véritablement un lien entre l'activité solaire et les températures ou s'il s'agit simplement d'un hasard. Il se peut qu'une petite partie de la montée actuelle des températures vienne du fait que l'activité est particulièrement grande en ce moment, mais la majorité du réchauffement est provoquée par l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

### Position des taches

Les taches n'apparaissent pas n'importe où sur la surface du Soleil. Elles apparaissent presque toutes entre 30° de latitude nord et 30° de latitude sud, donc tout près de l'équateur. Les premières taches qui apparaissent dans un cycle apparaissent plutôt loin de l'équateur (à environ 30° de latitude). À mesure que le cycle solaire progresse, les taches apparaissent de plus en plus près de l'équateur. Le graphique suivant (appelé le *butterfly diagram*) montre la latitude des taches qui apparaissent en fonction du temps. On voit ce rapprochement vers l'équateur pour chaque cycle.

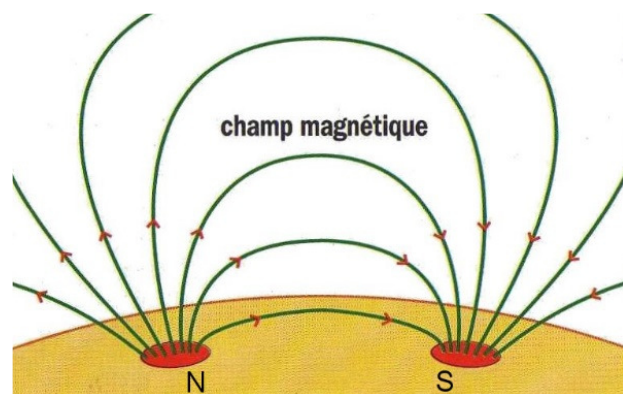


[fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le\\_de\\_Babcock-Leighton#/media/Fichier:Sunspot\\_butterfly\\_diagram.svg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_de_Babcock-Leighton#/media/Fichier:Sunspot_butterfly_diagram.svg)

### Les taches et le champ magnétique

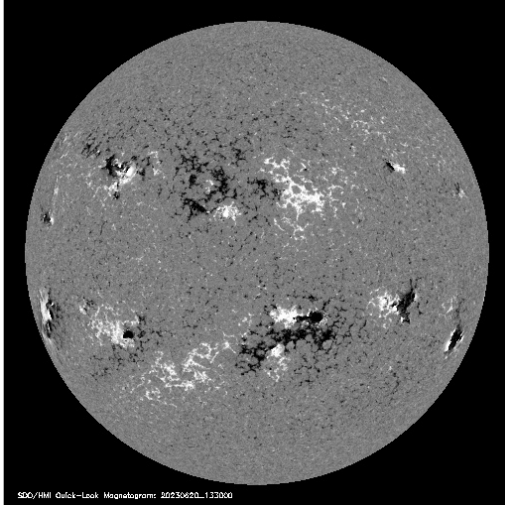
Les mesures du champ magnétique solaire montrent que les taches correspondent à des endroits où le champ magnétique est beaucoup plus fort. Le champ est environ 100 fois plus fort dans les taches.

Les taches apparaissent toujours par paires : une où les lignes de champ sortent (nord) et une où les lignes de champ entrent dans le Soleil (sud). Les lignes de champ forment donc des boucles qui sortent du Soleil en allant d'une tache à une autre. Les taches correspondent aux endroits où il y a plusieurs lignes de champ qui entrent et sortent du Soleil.



[tpesoleil.e-monsite.com/pages/comme-des-representations-negatives/le-soleil-tout-en-fusion.html](http://tpesoleil.e-monsite.com/pages/comme-des-representations-negatives/le-soleil-tout-en-fusion.html)





csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/sun/magnetic.html

On peut même faire des images, comme celle de gauche, qui montrent la polarité des taches. (Image du 20 juin 2023.)

Les lignes sortent du Soleil aux taches blanches et entrent aux taches noires.

Vous pouvez admirer les taches et leur polarité sur le Soleil en ce moment sur ce site.

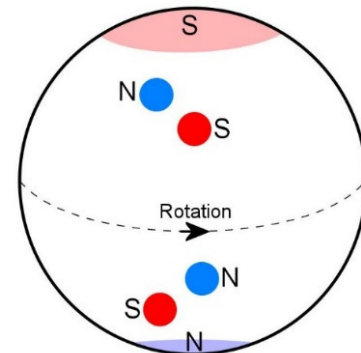
<https://soho.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>

et cliquez sur l'image de « magnetogram ».

### L'inversion du champ magnétique

Les taches sont liées à l'inversion du champ magnétique du Soleil. Quand les taches apparaissent, la tache du devant (le devant étant la direction de rotation du Soleil) et toujours plus près de l'équateur que celle de derrière.

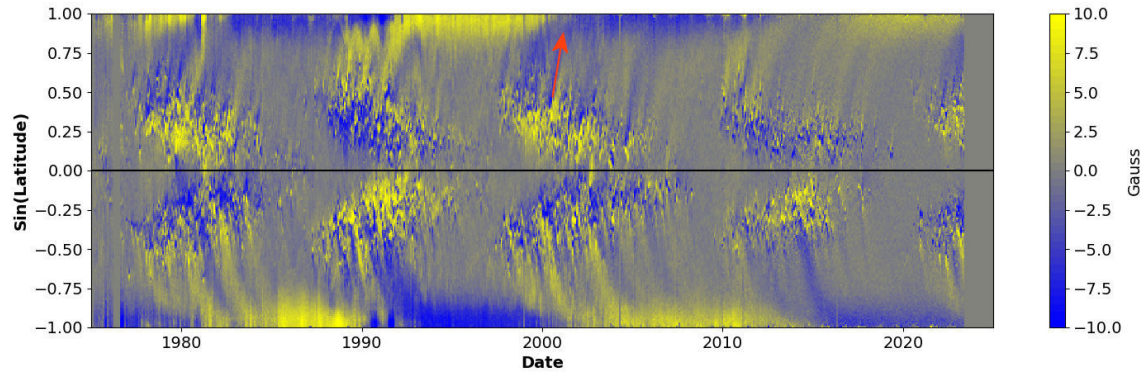
De plus, la tache de derrière est toujours de la polarité inverse de celle au pôle du Soleil. Par exemple, sur la figure de droite, la tache de derrière de l'hémisphère nord à une polarité nord alors que le pôle du Soleil à une polarité sud.



twitter.com/mathewjowens/status/1019541490006220800

Cette zone de polarité nord va ensuite migrer vers le pôle de l'étoile. Le diagramme suivant montre bien cette migration des taches. Prenons, par exemple, le cycle solaire aux environs de 2000. Au début du cycle, on a un nord magnétique (en jaune) au pôle nord de Soleil. On voit les taches qui apparaissent (points bleus et jaunes) et on voit que les taches qui apparaissent un peu plus loin de l'équateur (dans l'hémisphère nord) ont une polarité sud (en bleu). On voit très bien que ces points bleus migrent ensuite vers le pôle nord (flèche rouge) pour finalement faire changer la polarité au pôle de l'étoile. On voit aussi cette migration de points jaunes dans l'hémisphère sud qui fait finalement passer le pôle sud du Soleil d'une polarité magnétique sud à nord.





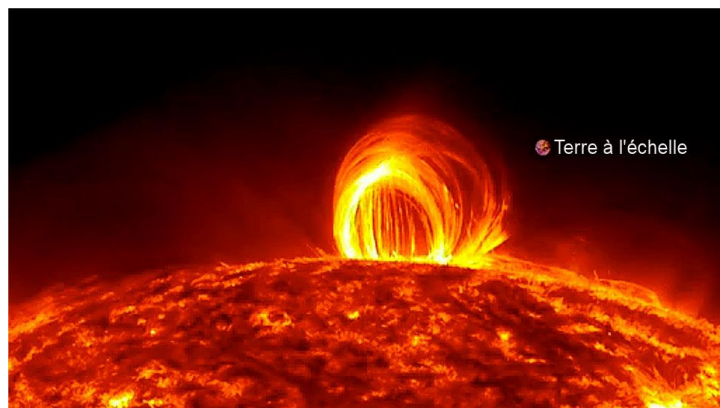
[www.solarcyclescience.com/solarcycle.html](http://www.solarcyclescience.com/solarcycle.html)

Pendant la migration, on ne voit pas de taches se déplacer. Les taches se dissipent au bout d'un certain temps, mais il reste quand même deux zones de champ magnétique nord et sud plus faibles et plus étendues que ce qu'on avait quand elles formaient des taches. C'est la migration des zones diffuses de champ magnétique de derrière vers les pôles qui fait inverser le champ magnétique du Soleil. Comme on peut le voir sur le graphique, l'inversion du champ se fait pratiquement au moment où il y a les plus de taches à la surface du Soleil.

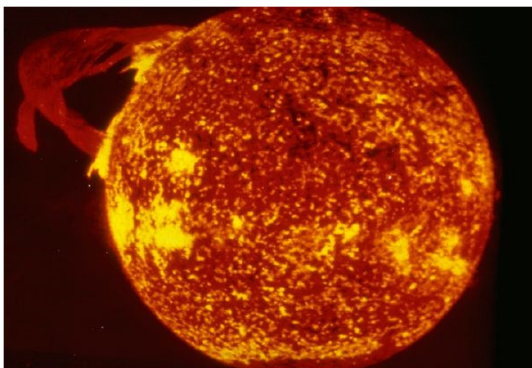
Les zones magnétiques du devant ne migrent pas vers les pôles. Elles restent près de l'équateur où elles se dissipent et finissent par s'annuler avec celle de l'autre hémisphère.

## Les protubérances

Les protubérances sont des arcs de matière s'élevant au-dessus de la surface du Soleil. On a placé la Terre à la même échelle sur cette image pour qu'on saisisse bien l'immensité des protubérances.



[www.abstruze.com/2013/02/](http://www.abstruze.com/2013/02/)

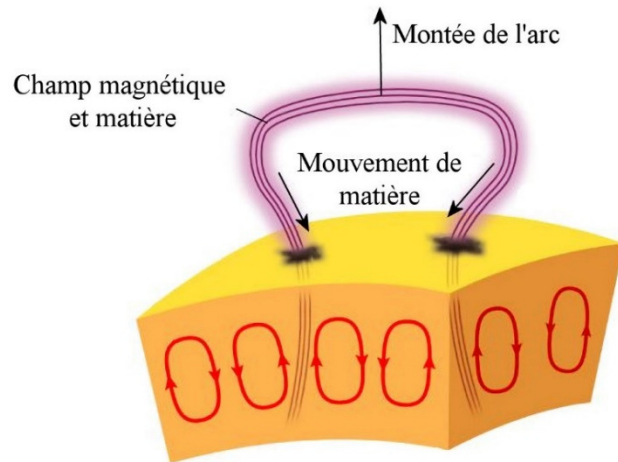


Typiquement, elles s'élèvent à 100 000 km au-dessus de la surface du Soleil. Elles peuvent même avoir une taille encore plus considérable comme le montre cette image.

[hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/spaceweather.htm](http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/spaceweather.htm)

Ces protubérances sont associées aux boucles de champ magnétique associées aux taches. En fait, les protubérances se forment quand les boucles de champ sortent du Soleil. Quand les lignes de champ magnétique sortent du Soleil, elles entraînent aussi avec elles la matière du Soleil. La matière est entraînée par la boucle parce que le champ magnétique est généré dans un plasma (gaz chaud ionisé), le champ magnétique et la matière sont comme fixés l'un dans l'autre. Cela veut dire que si la matière se déplace, le champ doit suivre le déplacement de la matière. Cela veut dire aussi que si le champ se déplace, la matière doit suivre ce déplacement. Le seul déplacement de matière possible est un déplacement de la matière le long des lignes de champ magnétique.

Ainsi, quand la boucle sort du Soleil, la matière doit suivre ce mouvement, ce qui mène à la formation d'un arc de matière au-dessus de la surface. La matière se déplace ensuite le long des lignes de champ pour retourner dans le Soleil.



scientificgamer.com/how-is-sunspot-formed/

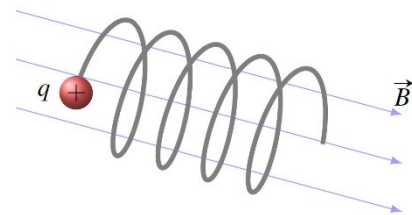
On peut très bien voir ces mouvements dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=EATDvxnlXyc>

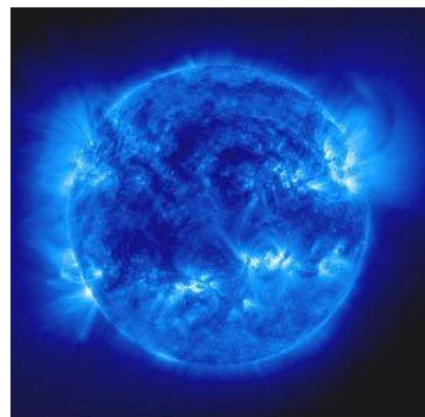
Cette protubérance a duré quelques heures.

Parfois, certaines de ces boucles sont plus grandes, ce qui génère des protubérances géantes.

On a dit que la matière pouvait se déplacer dans la direction parallèle aux lignes de champs. Plus précisément, la matière qui se déplace parallèlement aux lignes de champ le fait en faisant un mouvement hélicoïdal, comme si la particule chargée tournait autour des lignes de champ tout en suivant les lignes.



Cela signifie que ces électrons qui se déplacent dans le champ accélèrent constamment. Or, des particules qui accélèrent émettent du rayonnement électromagnétique qu'on appelle *le rayonnement synchrotron*. Dans ce cas-ci, les conditions font en sorte que les électrons émettent beaucoup de rayons X. Le rayonnement X des protubérances est 1000 fois plus grand que celui émis par le reste du Soleil. On peut donc très bien voir les protubérances sur cette image en rayon X du Soleil.



[www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astonomie-soho-10-ans-observation-soleil-resultats-scientifiques-7744/](http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astonomie-soho-10-ans-observation-soleil-resultats-scientifiques-7744/)

## 4.7 LA COURONNE

Le Soleil ne se termine pas à sa surface. La surface correspond simplement à l'endroit où le gaz composant le Soleil devient transparent. En fait, il y a encore de la matière au-dessus de la surface du Soleil, bien que sa densité soit très faible. Sa densité est d'à peine  $10^5$  particules/cm<sup>3</sup>, alors que la densité de l'atmosphère de la Terre est de  $10^{19}$  particules/cm<sup>3</sup> au niveau de la mer.

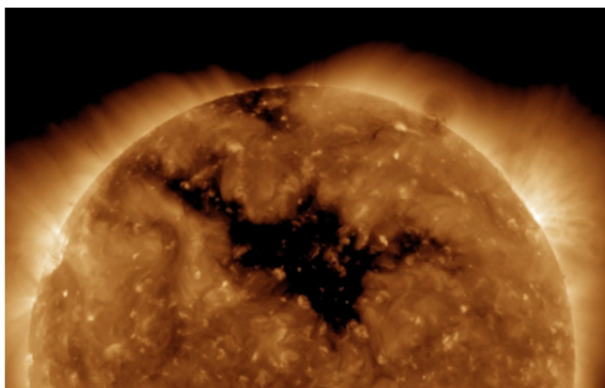
Curieusement, la température du gaz remonte quand on s'élève au-dessus de la surface du Soleil. Cette température atteint même 1 000 000 °C à 10 000 km de la surface. Ce qui est encore plus incroyable, c'est qu'on ne sait pas vraiment pourquoi la température remonte ainsi. Ce pourrait être la convection qui génère des ondes dans la matière qui compose l'atmosphère du Soleil. Puisque la densité du gaz baisse en s'éloignant du Soleil, la vitesse des ondes augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la vitesse du son. Quand c'est le cas, cela génère une onde de choc et l'énergie de l'onde se dissipe alors en chaleur. Ce pourrait aussi être des variations de champ magnétique qui génèrent des courants électriques dans la couronne, ce qui génère de la chaleur. Ce pourrait aussi être une combinaison de plusieurs mécanismes.

Ce gaz très chaud entourant le Soleil est lumineux (comme tout objet chaud). Sa densité est par contre si faible que le rayonnement émis par ce gaz n'est pas très fort et il est masqué par la lumière provenant du Soleil. Cependant, on peut voir ce rayonnement quand le Soleil est caché par la Lune lors d'une éclipse. C'est ce gaz chaud qu'on peut voir sur cette photo d'une éclipse. Cette zone autour du Soleil s'appelle la *couronne solaire*.



[www.eso.org/public/outreach/eduoff/vt-2004/mt-2003/mt-sun.html](http://www.eso.org/public/outreach/eduoff/vt-2004/mt-2003/mt-sun.html)

La couronne a une structure assez complexe puisqu'elle est formée de gaz ionisé dont les mouvements sont fortement influencés par le champ magnétique du Soleil. Quand le champ devient plus complexe lors des



[apod.nasa.gov/apod/ap100828.html](http://apod.nasa.gov/apod/ap100828.html)

maximums d'activité, la structure de la couronne devient plus complexe et on peut souvent observer des trous dans la couronne, qu'on appelle des *trous coronaux* (où la densité de la couronne est environ 10 fois plus basse que pour le reste de la couronne). L'image de la couronne à gauche, obtenue par des observations en rayons X, montre bien un de ces trous coronaux.

De grands trous comme celui-ci n'apparaissent que quelques fois par décennies. Par contre, des trous plus petits, d'un diamètre de l'ordre de 10 000 km, apparaissent quotidiennement.

## 4.8 LE VENT SOLAIRE, LES ÉRUPTIONS SOLAIRES ET LES ÉJECTIONS DE MASSE

### Le vent solaire

Le Soleil perd constamment des particules (noyaux atomiques et électrons). Ces particules s'éloignent du Soleil en formant le *vent solaire*.

Ces particules proviennent en bonne partie de la couronne. La température élevée de la couronne fait en sorte que les électrons et une petite partie des noyaux atomiques ont des vitesses supérieures à la vitesse de libération. Comme les électrons peuvent s'échapper plus facilement que les noyaux, la couronne devient positive et l'extérieur de la couronne devient négatif. Cela génère un champ électrique qui accélère les noyaux atomiques vers l'extérieur ce qui fait en sorte que les protons ont finalement une vitesse de 300 à 500 km/s quand ils arrivent à quelques rayons solaires du Soleil. C'est la composante lente du vent solaire. Évidemment, la configuration du champ magnétique influence fortement le mouvement de ces particules chargées près du Soleil et il y a encore beaucoup de débats concernant les détails du mécanisme d'émission.

Parfois, une composante rapide, dans laquelle les particules ont des vitesses d'environ 750 km/s (à quelques rayons solaires du Soleil), s'ajoute au vent solaire. On a cette composante quand la configuration du champ magnétique du Soleil dans la couronne permet, à certains endroits, au gaz chaud de la photosphère, de s'échapper dans l'espace (ce sont les trous coronaux).

Entre 1 et 2 millions de tonnes de gaz s'échappent ainsi du Soleil chaque seconde. En 8 heures, le Soleil perd une masse de gaz équivalente à toute l'atmosphère de la Terre. Ça semble beaucoup, mais cela ne représente que  $2 \times 10^{-14}$  masse solaire par année. Le Soleil n'a perdu ainsi qu'une fraction négligeable de sa masse depuis qu'il est devenu une étoile il y a 4,6 milliards d'années.

La Terre est continuellement bombardée par ces particules en provenance du Soleil. On reçoit alors un gaz peu dense (densité qui varie entre 0,4 et 80 ions par  $\text{cm}^3$ ) formé de particules se déplaçant à des vitesses variant entre 300 km/s et 700 km/s.

Vous pouvez voir sur ce site la vitesse actuelle du vent solaire qui arrive sur Terre.

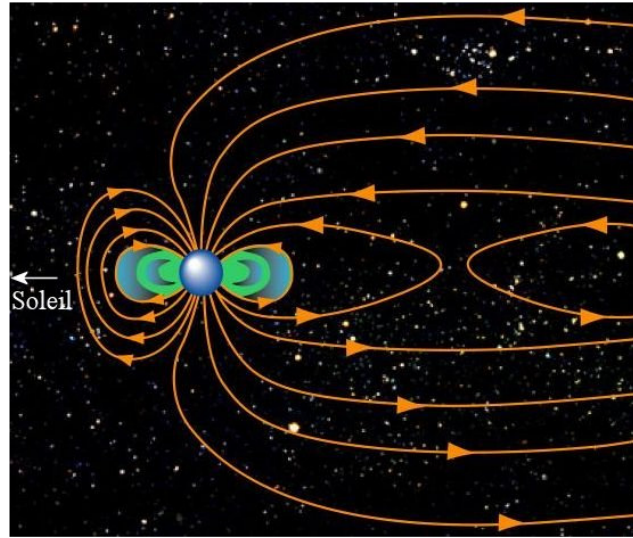
<http://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>

Les particules du vent solaire n'ont pas assez d'énergie pour traverser le champ magnétique terrestre. La plupart des particules sont simplement déviées et contournent la Terre.



Quelques-unes deviennent prisonnières du champ dans les ceintures de Van Allen mentionnées au chapitre 1. Elles peuvent seulement frapper l'atmosphère aux pôles magnétiques en suivant les lignes de champ. Quand le vent solaire augmente, la quantité de particules qui arrive aux pôles peut être assez grande pour qu'on observe des aurores.

Les champs magnétiques et les plasmas sont figés ensemble. Ainsi quand le vent solaire arrive à la Terre, le champ de la Terre ne peut pas pénétrer le vent solaire. L'interaction entre les particules du vent solaire et le champ de la Terre déforme donc le champ magnétique de la Terre. Cela comprime le champ de côté du Soleil et l'étire du côté opposé au Soleil.



[image.gsfc.nasa.gov/poetry/educator/Earth1012.html](http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/educator/Earth1012.html)

Le vent solaire constitue également une autre protection contre les rayons cosmiques puisque les rayons cosmiques doivent se battre contre le vent solaire pour arriver jusqu'à la Terre. 90 % des rayons cosmiques sont ainsi bloqués par le vent solaire. En fait, le vent solaire forme une bulle de protection contre les rayons cosmiques qui s'étend jusqu'à une distance de presque 100 UA. Cependant, cela fait en sorte que les variations du vent solaire font varier la quantité de rayons cosmiques qui arrive sur Terre. Si le vent diminue, la protection offerte par le vent diminue et plus de rayons cosmiques peuvent atteindre la Terre. Notez que le champ magnétique du Soleil influence la trajectoire des rayons cosmiques qui arrivent. Le flux de rayons cosmiques qui atteint la Terre varie donc avec le cycle de 11 ans du champ magnétique solaire.

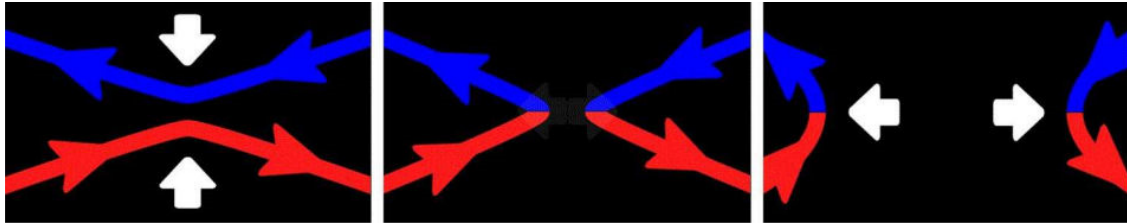
## Les éruptions solaires et les éjections de masse

Les processus à l'origine des éruptions solaires et des éjections de masse coronales sont extrêmement compliqués et ils ne sont pas entièrement compris. Ils sont liés à des configurations très complexes du champ magnétique à la surface du Soleil. On présente ici une version simplifiée de ces phénomènes.

### La reconnexion du champ magnétique

Quand le champ magnétique a une configuration très complexe, il arrive que des régions ayant des champs magnétiques dans des directions opposées s'approchent beaucoup l'une de l'autre. Dans un plasma, il est possible que la configuration du champ change en reconnectant les lignes de champ.





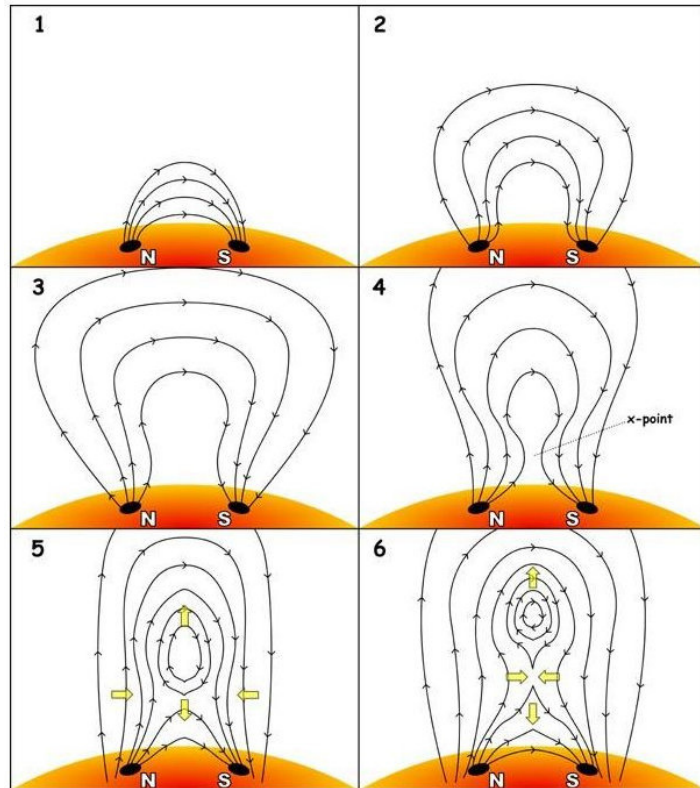
[sci.esa.int/web/cluster/-/36452-reconnecting-magnetic-field-lines](http://sci.esa.int/web/cluster/-/36452-reconnecting-magnetic-field-lines)

Ce processus de reconnexion est à l'origine de plusieurs phénomènes observés sur le Soleil.

Les éruptions

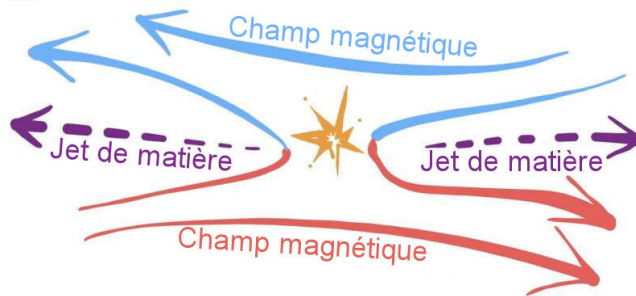
Le processus s'enclenche quand une boucle de champ magnétique s'élève au-dessus de la surface du Soleil. Le champ va alors se déformer comme illustré sur la figure de droite.

On voit qu'il y a eu une reconnexion du champ qui se fait à l'endroit indiqué par « x-point » sur la figure 4.



[www.astro.wisc.edu/~clinch/](http://www.astro.wisc.edu/~clinch/)

Les équations de l'électromagnétisme indiquent qu'il doit y avoir un champ électrique quand cette reconnexion se produit. Ce champ électrique dans le plasma propulse alors les particules chargées dans les directions montrées sur la figure de droite.



[phys.org/news/2022-04-theory-mystery-fast-magnetic-reconnection.html](http://phys.org/news/2022-04-theory-mystery-fast-magnetic-reconnection.html)

Les vitesses des particules chargées projetées peuvent parfois atteindre des vitesses très près de la vitesse de la lumière. Ces particules interagissent alors avec le plasma environnant, provoquant une augmentation de température (10 à 20 millions de degrés

Celsius) et l'émission de divers types de radiation, allant des ondes radio aux rayons gamma. Cette augmentation soudaine de la radiation émise par le Soleil est une *éruption solaire*. L'énergie totale de ces éruptions, qui durent quelques minutes, est typiquement de  $10^{20}$  joules, mais elle peut parfois atteindre  $10^{25}$  joules. (Notez que cette énergie représente environ toute l'énergie reçue sur Terre en provenance du Soleil pendant 1 an.) Ces éruptions se produisent quelques fois par jour durant les maximums d'activité solaire et environ 1 fois par semaine durant les minimums d'activité solaire.

### Les éjections de masse

Quand il y a reconnexion du champ, dans une boucle qui monte, il se forme alors un genre de bulle magnétique ayant la forme d'un croissant. La reconnexion fait en sorte que cette bulle subit une poussée qui la force à s'éloigner du Soleil.

Parfois, la bulle de champ magnétique parvient à s'échapper du Soleil avec de la matière piégée à l'intérieur. On a alors une *éjection de masse coronale* (CME pour *Coronal Mass Ejection*). Typiquement,  $10^{13}$  kg de matière est éjecté à 500 km/s, pour une énergie totale de  $10^{24}$  joules. Pendant les périodes d'activité maximale, il peut y avoir de telles éjections quelques fois par jour.



[lweb.cfa.harvard.edu/~namurphy/Lectures/Ay253\\_2016\\_11\\_MagneticReconnection.pdf](http://web.cfa.harvard.edu/~namurphy/Lectures/Ay253_2016_11_MagneticReconnection.pdf)

Voici un bon exemple d'éjection de masse coronale.

[http://www.youtube.com/watch?v=6\\_SzVp2LtgI](http://www.youtube.com/watch?v=6_SzVp2LtgI)

En s'éloignant, la bulle crée une onde de choc dans la couronne. Cette onde de choc peut accélérer des protons (ou autres noyaux atomiques ionisés). Ces protons émis par le Soleil sont les SPE (*solar proton events* ou *solar particle events*). Les champs magnétique et électrique de la bulle permettent aux protons de surfer dans l'onde de choc jusqu'à atteindre des énergies qui peuvent être 10 millions de fois plus grandes que celle des protons du vent solaire. L'accélération des particules génère aussi des ondes radio, qu'on détecte. La plupart de ces protons n'ont pas l'énergie nécessaire pour traverser le champ magnétique terrestre (sauf pour les plus énergétiques). Quelques-uns viendront frapper l'atmosphère aux pôles magnétiques.

### L'interaction avec la Terre avec les éjections de masse

Quand la Terre est frappée par une telle bulle de champ magnétique contenant de la matière, le champ magnétique de l'éjection interagit avec le champ magnétique de la Terre et le perturbe. Voici une animation de cette interaction.

<http://www.youtube.com/watch?v=tBC98KovJyk>

On a alors une tempête magnétique. Les effets sont plus importants si le champ magnétique éjecté a une polarité opposée au champ magnétique terrestre.

En plus de l'arrivée de plusieurs particules, les variations de champ peuvent mener à la libération massive de particules chargées jusque-là prisonnière du champ magnétique terrestre. Elles peuvent aussi mener à des reconnexion dans le champ magnétique terrestre qui généreront des particules chargées à haute vitesse. Les particules libérées et les particules accélérées peuvent alors suivre les lignes de champ magnétique terrestre pour aller frapper l'atmosphère aux pôles. Cela donnera d'importantes aurores. (Dans le dernier clip, on peut voir ces particules libérées qui viennent frapper l'atmosphère aux pôles et générer des aurores.)

Comme les variations de champ magnétique sont accompagnées de champs électriques, les tempêtes magnétiques peuvent provoquer la formation de courants électriques dans les réseaux électriques. Le 13 mars 1989, une telle éruption a tellement perturbé le champ magnétique de la Terre que tout le réseau électrique du Québec est tombé en panne. Pratiquement tout le Québec fut privé d'électricité pendant plus de 9 heures.

La tempête magnétique solaire des 1 et 2 septembre 1859 fut particulièrement intense (on l'appelle le *Carrington event*). On pouvait voir des aurores jusque dans les Caraïbes et on pouvait lire dehors la nuit à la lumière des aurores dans le nord-est des États-Unis. Il n'y avait pas de réseaux électriques à cette époque, mais plusieurs réseaux télégraphiques tombèrent en panne. Une tempête de cette ampleur ferait d'énormes dommages aujourd'hui (et cela va arriver un jour...) Comme les éjections de masse prennent quelques jours pour arriver sur Terre, on aura peut-être le temps de se préparer un peu (si on a détecté l'éjection de masse se dirigeant vers nous...).

L'arrivée massive de particules en haute atmosphère augmente la production d'oxyde d'azote. En mesurant la quantité de ces oxydes d'azote dans les bulles d'air prisonnières des glaces aux pôles, on peut déterminer que la tempête 1859 a été la plus importante des 500 dernières années.

On a vu au chapitre 1 que les particules qui frappent la haute atmosphère peuvent également transformer l'azote 14 en carbone 14. Une augmentation de la quantité de carbone 14 à une époque (qu'on peut aussi mesurer avec les bulles d'air prisonnières des glaces) peut être une indication qu'il y a eu une arrivée massive de particules. Il y a eu une telle augmentation il y a 10 000 ans. Comme il ne semble pas y avoir de cause à cette arrivée massive à l'extérieur du Système solaire, ces particules proviendraient du Soleil. Ce pourrait être une éruption 100 fois plus grande que celle de 1859. En même temps, il y a eu un léger refroidissement du climat, le Dryas récent qui a mené à une petite période d'extinction. On sait qu'une augmentation des réactions en haute atmosphère peut détruire la couche d'ozone et entraîner une extinction, mais on ne sait pas vraiment à quel point elle peut modifier le climat. Difficile donc de dire s'il y a un lien entre une éruption massive et le climat de l'époque.

Mentionnons finalement que si un astronaute se fait surprendre par une éjection de masse coronale, les effets sur sa santé pourraient être catastrophiques.

## 4.9 LA SOURCE D'ÉNERGIE DU SOLEIL

### Une réaction chimique

Quand on a découvert la conservation de l'énergie au 19<sup>e</sup> siècle, il devenait essentiel de découvrir la source d'énergie du Soleil. D'où peut bien provenir cette énergie de  $3,828 \times 10^{26}$  joules émise chaque seconde par le Soleil ?

La première solution, envisagée en 1854, semble évidente : une réaction chimique. Par exemple, le Soleil pourrait être simplement un gros morceau de charbon qui brûle.

Estimons pendant combien de temps le Soleil pourrait briller avec une réaction chimique. Imaginons que cette énergie est obtenue par la combustion de l'hydrogène, l'élément le plus abondant dans le Soleil. Ce pourrait être une bonne source d'énergie parce que c'est une des réactions qui nous fournit le plus d'énergie par kilogramme de combustible, soit 142 000 000 J/kg. En réalité, ce ne pourrait pas être la véritable réaction parce qu'il n'y a vraiment pas assez d'oxygène dans le Soleil pour faire cette combustion. (Peut-être qu'il y en avait beaucoup plus avant et qu'on est arrivé à la fin des réserves d'oxygène, ce qui voudrait dire que la fin du monde est pour bientôt. Mais alors, où seraient toute l'eau et le CO<sub>2</sub> que cette réaction aurait produit ?) Même si la réaction est impossible, ça va nous donner une idée de la durée de vie du Soleil s'il fonctionne avec une réaction chimique.

Comme le Soleil a une masse de  $2 \times 10^{30}$  kg, cela veut dire que le nombre total de joules qu'on peut obtenir est (en supposant que toute cette masse est de l'hydrogène)

$$\begin{aligned} E &= 142\,000\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 2 \times 10^{30} \text{ kg} \\ &= 2,84 \times 10^{38} \text{ J} \end{aligned}$$

On trouve la durée de vie du Soleil en divisant l'énergie totale par le rythme auquel on l'émet, qui est la luminosité du Soleil.

$$t_{\text{vie}} = \frac{E}{L}$$

En dépensant cette énergie au rythme de  $L = 3,828 \times 10^{26}$  J/s, la durée de vie du Soleil est donc

$$\begin{aligned} t_{\text{vie}} &= \frac{E}{L} \\ &= \frac{2,84 \times 10^{38} \text{ J}}{3,828 \times 10^{26} \frac{\text{J}}{\text{s}}} \end{aligned}$$



$$= 7,47 \times 10^{11} \text{ s}$$

$$= 24\,000 \text{ ans}$$

Avec d'autres réactions chimiques plausibles, qui donnent moins d'énergie par kilogramme que la combustion de l'hydrogène, la durée de vie du Soleil serait encore plus petite.

Ça semble correct si vous acceptez l'idée que la Terre et le Soleil ont été créés le 26 octobre 4004 av. J.-C. comme l'affirme la Bible, mais ça semble vraiment trop court si vous acceptez les évidences géologiques qui montrent que la Terre a plusieurs milliards d'années. Déjà au 19<sup>e</sup> siècle, on avait montré que des couches de sédimentation ont dû prendre des centaines de millions d'années pour se former. Cela était impossible si le Soleil n'avait qu'une durée de vie de quelques milliers d'années. De toute évidence, le Soleil ne tire pas son énergie d'une réaction chimique.

## L'énergie gravitationnelle

On a ensuite exploré l'idée que l'énergie puisse venir de la seule autre source d'énergie concevable à l'époque : l'énergie gravitationnelle. Mayer (1846), Waterston (1853) et Kelvin (1854) proposent que l'énergie viendrait de météorites tombant dans le Soleil, mais les calculs montrent qu'il en faudrait beaucoup trop. Plus réalistement, Helmholtz (1854) et Kelvin (1857) proposent que le Soleil obtiendrait son énergie par la libération d'énergie gravitationnelle provenant de la contraction continue du Soleil. C'est ce qu'on appelle la *contraction de Kelvin-Helmholtz*.

L'énergie gravitationnelle diminue quand 2 masses se rapprochent l'une de l'autre. Si le Soleil se contracte, tous les atomes du Soleil s'approchent les uns des autres et cela libère de l'énergie gravitationnelle.

La moitié de l'énergie doit rester dans l'étoile pour maintenir l'équilibre de l'étoile, mais l'autre moitié doit être rayonnée. Cette énergie rayonnée pourrait donc être la source d'énergie du Soleil.

Évidemment, si la contraction gravitationnelle est la source d'énergie, cela signifie que le Soleil devient de plus en plus petit. Cela implique qu'il était plus gros dans le passé. Toutefois, on peut difficilement imaginer que le Soleil aurait pu être plus gros que l'orbite de Mercure au départ. Sinon, Mercure aurait été dans le Soleil et cette planète se serait probablement vaporisée. On pourrait donc avoir les valeurs suivantes pour la grosseur du Soleil.

Rayon initial : rayon de l'orbite de Mercure = 60 000 000 km  
 Rayon actuel : 696 000 km

En partant de ces données, on peut calculer que l'énergie qui peut être rayonnée par cette contraction est de  $3,044 \times 10^{41}$  J. C'est presque 1000 fois plus que ce qu'on peut obtenir par une réaction chimique !

Cette énergie libérée permettrait au Soleil de briller depuis 25 millions d'années ! C'est déjà beaucoup mieux qu'avec une réaction chimique. Ce temps était aussi en accord avec les calculs faits par Kelvin concernant le refroidissement de la Terre et qui donnent un âge de quelques dizaines de millions d'années à la Terre.

Toutefois, la durée de vie semblait trop petite pour certains. Selon les géologues du 19<sup>e</sup> siècle, des indices montraient que la Terre devait avoir au moins plusieurs centaines de millions d'années. De plus, l'hypothèse de la contraction prévoyait que le diamètre du Soleil devait diminuer de 70 m par année. Pourtant, les astronomes ne semblaient pas voir une telle diminution.

## La fusion nucléaire

En 1896, on découvre la radioactivité. Lors d'une désintégration radioactive, le noyau atomique subit une transformation, ce qui libère de l'énergie. Dès 1904, Rutherford spécule que la radioactivité pourrait possiblement être la source d'énergie du Soleil. On a examiné cette possibilité pendant quelques années, mais on a dû se rendre à l'évidence que cette solution était impossible. Il faudrait une quantité phénoménale de substance radioactive pour que le Soleil puisse briller pendant plusieurs centaines de millions d'années.

Toutefois, en 1919, Ernest Rutherford et James Chadwick parviennent, pour la première fois, à modifier des noyaux atomiques en faisant une collision entre des noyaux d'hélium et des noyaux d'azote. Ce sont les *réactions nucléaires*. Parfois, ce genre de réaction demande de l'énergie, mais parfois certaines réactions libèrent de l'énergie.

Cette découverte a alors mené à la question suivante : est-ce qu'une telle réaction entre les noyaux atomiques pourrait être la source d'énergie du Soleil ? Pour bien analyser cette possibilité, on doit préalablement examiner les bases de la physique nucléaire.

### La composition du noyau

Les noyaux sont composés de deux particules : les protons et les neutrons.

Proton ( $p^+$ )	Masse : $m_p = 1,672\ 6 \times 10^{-27}$ kg	Charge = $+ 1,602 \times 10^{-19}$ C
Neutron ( $n^0$ )	Masse : $m_n = 1,675\ 0 \times 10^{-27}$ kg	Charge = 0 C

Le nombre de protons dans un noyau est simplement égal au numéro atomique de l'élément.

Le nombre de neutrons dans un noyau peut varier pour un même élément. Les différentes possibilités obtenues en variant le nombre de neutrons sont les différents *isotopes* d'un élément.

Le proton et le neutron sont les deux seuls membres de la famille des *nucléons*.

On utilisera la notation suivante pour représenter les noyaux :  ${}^A\text{Sy}$  où  $\text{Sy}$  est le symbole chimique de l'élément et  $A$  est le nombre de nucléons (c'est donc la somme du nombre de protons et de neutrons).

Par exemple, voici les principaux isotopes de l'hydrogène.

${}^1\text{H}$	Composé d'un seul proton
${}^2\text{H}$ (appelé aussi deutérium)	Composé d'un proton et d'un neutron
${}^3\text{H}$ (appelé aussi tritium)	Composé d'un proton et de deux neutrons

L'hydrogène naturel est composé de 99,9885 % d'hydrogène 1, de 0,0115 % d'hydrogène 2 et d'environ  $10^{-16}$  % d'hydrogène 3.

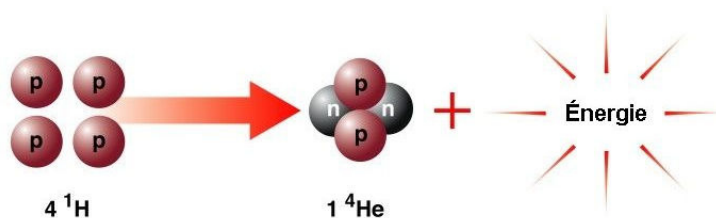
### Des réactions nucléaires dans le Soleil ?

Après la découverte des réactions nucléaires en 1919, Arthur Eddington et Jean Perrin suggèrent (indépendamment), dès 1920, que 4 noyaux d'hydrogène pourraient fusionner pour former de l'hélium ( $4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$ ).

Lentement, la théorie de la fusion devient plus plausible. Premièrement, on se rend compte qu'il y a beaucoup d'hydrogène et d'hélium dans le Soleil. (Eddington pensait que le Soleil était surtout composé d'éléments lourds, comme le fer, et qu'il n'y avait environ que 5 % d'hydrogène dans le Soleil. Cecilia Payne a été une des premières à envisager, en 1925, que le Soleil est essentiellement composé d'hydrogène. En 1930, tous acceptent l'idée).

Finalement, il devient évident que la fusion est la source d'énergie du Soleil durant les années 30 quand on découvre les détails de la réaction de fusion. Notons les contributions de Robert d'Escourt Atkinson et Fritz Houtermans (1929), Carl Friedrich von Weizsäcker (1937), Hans Bethe (1937 et 1938) et Charles Critchfield (1937). En 1939, on peut dire que la question était réglée. Bethe reçoit le Prix Nobel en 1967 pour ses travaux (sa candidature avait été proposée 48 fois entre 1943 et 1966).

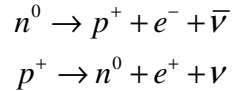
La réaction est toutefois plus complexe qu'un simple échange de protons et neutrons parce que les noyaux d'hydrogène sont simplement des protons alors que les noyaux d'hélium sont formés de 2 protons et de 2 neutrons. On a quatre protons au départ, alors qu'on a deux protons et deux neutrons après la réaction. On doit donc commencer par élucider ce mystère : « Comment peut-on obtenir des neutrons dans le noyau d'hélium alors qu'il n'y en a pas au départ ? »



[physicsoftheuniverse.com/facts.html](http://physicsoftheuniverse.com/facts.html)

### La transformation des protons en neutrons

Pour comprendre d'où viennent ces neutrons, il faut savoir qu'il est possible de transformer un proton en neutron ou un neutron en proton. Les réactions de transformation, découverte par Fermi en 1934, sont



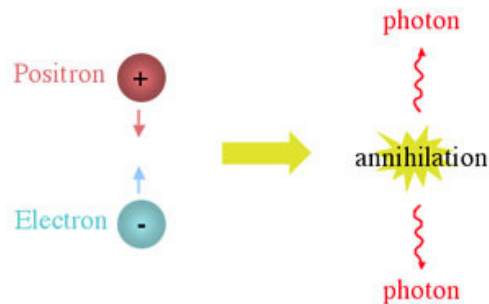
Dans ces formules,  $e^-$  est un électron,  $e^+$  est un antiélectron (aussi appelé positron ou positon),  $\nu$  représente un neutrino et  $\bar{\nu}$  représente un antineutrino.

### L'antimatière

Les antiélectrons sont de l'antimatière. Ce sont les antiparticules des électrons. C'est une particule qui a la même masse que l'électron, mais toutes ses autres propriétés sont inversées par rapport à l'électron. Par exemple, sa charge électrique est identique à celle de l'électron, mais de signe contraire.

Quand une particule et une antiparticule se rencontrent, elles disparaissent complètement (on dit qu'elles s'annihilent) en libérant beaucoup d'énergie sous forme de photon.

On peut aussi faire le processus inverse et créer de la matière à partir des photons. Dans ce cas, il se crée autant de matière que d'antimatière. Cette création de matière et d'antimatière se fait couramment dans les accélérateurs de particules.



[astronomy.swin.edu.au/cosmos/P/Positron](http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/P/Positron)

### Les neutrinos

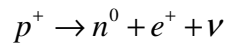
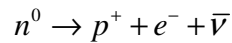
Les neutrinos sont des particules de masse très faible et ayant une charge électrique nulle. Ils interagissent très peu avec la matière. Chaque seconde, des milliards de neutrinos traversent votre corps sans aucun effet. Peut-être qu'une fois dans votre vie, un de ces neutrinos va interagir avec un atome dans votre corps.

L'existence des neutrinos a été suggérée en 1930 par Wolfgang Pauli pour expliquer la disparition d'énergie et de quantité de mouvement dans un type de désintégration, appelé désintégration bêta, dans lequel un proton devient un neutron ou un neutron devient un proton. Pauli a alors supposé qu'une autre particule indétectable était aussi présente après la désintégration et que c'est elle qui avait l'énergie et la quantité de mouvement manquante. On a confirmé expérimentalement l'existence du neutrino en 1956.



La transformation

Les réactions



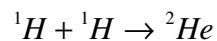
ne veulent pas dire qu'un neutron est fait d'un proton, d'un électron et d'un antineutrino (si on prend la première transformation en exemple). L'électron et l'antineutrino apparaissent quand le neutron devient un proton, ils n'étaient pas présents avant la transformation.

Quand un neutron se transforme en proton dans un noyau et qu'un électron est éjecté, on a une désintégration bêta – ( $\beta^-$ ). Quand un proton se transforme en neutron dans un noyau et qu'un positron est éjecté, on a une désintégration bêta + ( $\beta^+$ ).

C'est la transformation de proton en neutrons qui permet d'obtenir les neutrons dans notre noyau d'hélium.

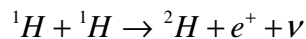
La réaction proton-proton

La première étape de la réaction n'est pas si simple. Si on commence uniquement avec des protons, il semble logique que la première et seule réaction possible soit la fusion de deux hydrogènes pour former de l'hélium 2.



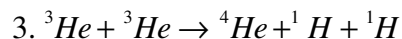
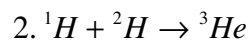
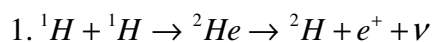
Toutefois, cette réaction demande de l'énergie. Cela fait en sorte que l'hélium 2 est extrêmement instable, et qu'il se resépare très rapidement en 2 hydrogènes. On a peut-être obtenu, très brièvement, de tels noyaux de  ${}^2\text{He}$  en laboratoire, mais on n'est même pas certains...

Heureusement, il y a une certaine chance, quoique très faible, que cette fusion se fasse quasi simultanément avec une transformation d'un des protons en neutron. On a alors la réaction suivante qui, elle, libère de l'énergie et donne un produit stable.

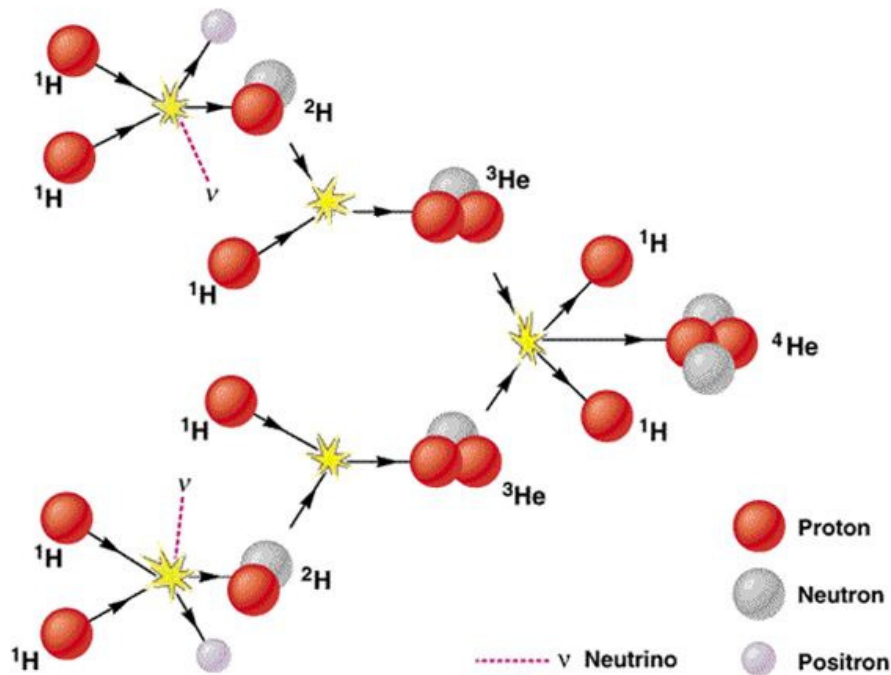


Une fois cette difficile étape critique franchie, les autres fusions se font assez rapidement pour finalement arriver à l'hélium.

Les étapes de cette réaction, appelée la *réaction PPI*, sont



Voici une représentation graphique de cette réaction.

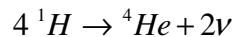


[pot.pcc.edu/~aodman/physics%20122/end%20of%20main%20sequence/endofmainsequence.htm](http://pot.pcc.edu/~aodman/physics%20122/end%20of%20main%20sequence/endofmainsequence.htm)

La réaction globale est donc



En fait, les antiélectrons de cette réaction n'iront pas bien loin. Ils rencontreront assez vite un électron et vont s'annihiler en libérant de l'énergie. Ils vont donc disparaître et on va obtenir



Il y a plusieurs réactions de fusion d'hydrogène en hélium possibles au centre du Soleil, mais celle illustrée ici est celle qui se produit dans environ 85 % des fusions.

### La durée de vie du Soleil avec la fusion de l'hydrogène

Sachant l'énergie fournie par une fusion, on peut maintenant calculer pendant combien de temps le Soleil pourrait briller.

On peut calculer qu'avec 1 kilogramme d'hydrogène, on peut obtenir  $6,271 \times 10^{14}$  J en fusionnant l'hydrogène en hélium. Pour vous donner une idée de la quantité phénoménale d'énergie que cela représente, sachez que cette énergie est suffisante pour subvenir à tous les besoins d'une maison québécoise moyenne pendant 6400 ans ! Tout ça avec un seul kilogramme d'hydrogène.

En passant, 7,7 % de l'énergie provient de l'annihilation des positrons avec des électrons. C'est quand même intéressant de constater que 7,7 % de l'énergie du Soleil provient de l'annihilation matière-antimatière !

Le Soleil a une masse de  $2 \times 10^{30}$  kg et on estime, qu'à sa naissance, un peu plus de 71 % de la masse du Soleil était de l'hydrogène. L'énergie totale qu'on peut obtenir avec la fusion de l'hydrogène est donc de

$$\begin{aligned} E &= 6,271 \times 10^{14} \frac{J}{kg} \cdot (0,71 \cdot 2 \times 10^{30} \text{ kg}) \\ &= 8,90 \times 10^{44} J \end{aligned}$$

Avec sa luminosité actuelle, la durée de vie du Soleil est donc

$$\begin{aligned} t_{\text{vie}} &= \frac{E}{L} \\ &= \frac{8,90 \times 10^{44} J}{3,828 \times 10^{26} W} \\ &= 2,33 \times 10^{18} s \\ &= 73,7 \text{ milliards d'années} \end{aligned}$$

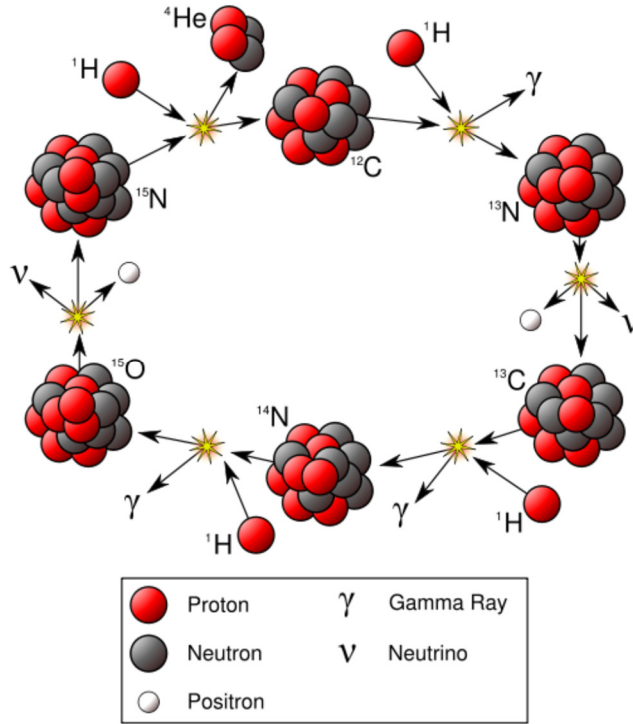
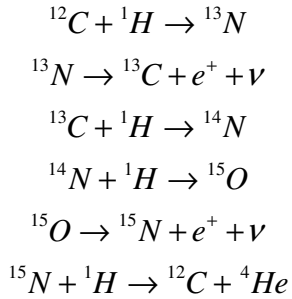
En fait, ceci est la durée de vie du Soleil si tout l'hydrogène du Soleil fusionnait. Des modèles plus sophistiqués montrent que seule une partie de l'hydrogène du Soleil pourra fusionner et on estime que le Soleil aura une durée de vie d'un peu plus de **10 milliards d'années** (10,91 milliards d'années plus précisément). C'est amplement suffisant pour être en accord avec l'âge de la Terre (et de tout le Système solaire) qui est estimé à 4,567 milliards d'années.

Avec un âge de 4,567 milliards d'années, et une durée de vie de 10,91 milliards d'années, il reste encore près de 6,34 milliards d'années de vie à notre Soleil.

Chaque seconde, le Soleil rayonne une énergie de  $3,828 \times 10^{26}$  J. Comme on sait qu'un kilogramme d'hydrogène nous donne  $6,397 \times 10^{14}$  joules, on peut calculer qu'il y a  $9,119 \times 10^{37}$  réactions chaque seconde, ce qui représente 610,5 millions de tonnes d'hydrogène. On peut se donner une idée de l'immense masse du Soleil en pensant que 610,5 millions de tonnes vont fusionner chaque seconde pendant près de 11 milliards d'années de la vie du Soleil et que toute cette masse qui fusionnera ne représente qu'environ 10 % de la masse du Soleil !

Le cycle CNO

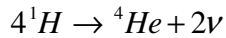
En 1938, Hans Bethe découvre une façon tout à fait différente de faire la fusion de l'hydrogène en hélium qui utilise le carbone 12 comme intermédiaire. Voici un diagramme illustrant cette réaction. Les étapes de cette réaction sont



en.wikipedia.org/wiki/CNO\_cycle

Les neutrinos solaires

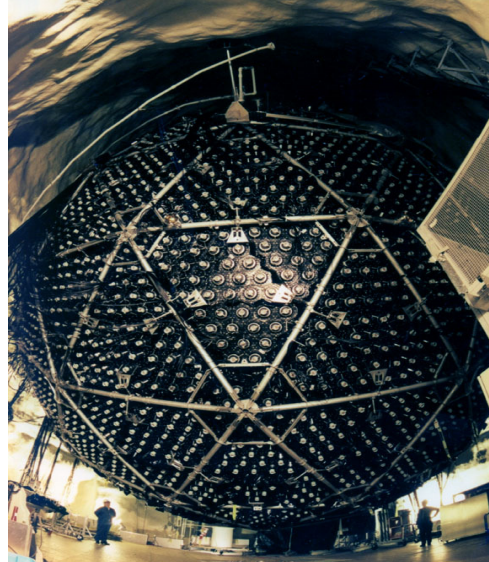
Il est difficile de vérifier si ce sont véritablement ces réactions qui se produisent dans le Soleil puisqu'on ne peut pas voir à l'intérieur du Soleil. Par contre, il existe une façon assez directe de vérifier si la théorie est possible : les neutrinos. On se rappelle que la réaction nucléaire globale est



Pour chaque réaction, il y a deux neutrinos produits. Comme il y a  $9,119 \times 10^{37}$  réactions de fusion chaque seconde, cela veut dire que  $1,824 \times 10^{38}$  neutrinos sont produits par le Soleil chaque seconde. Comme les neutrinos interagissent peu avec la matière, ils peuvent assez facilement sortir du Soleil (il faudrait que les neutrinos traversent environ 250 années-lumière de gaz ayant les caractéristiques du gaz au centre du Soleil pour que la moitié des neutrinos soient absorbés). C'est comme si le Soleil était très transparent pour les neutrinos (à peine un neutrino sur un milliard va interagir avec la matière solaire). Comme les neutrinos nous arrivent directement de l'intérieur du Soleil, ils peuvent nous fournir de l'information précieuse sur ce qui se passe au cœur du Soleil.



Une partie de ces neutrinos arrive sur Terre. Environ  $10^{15}$  (un million de milliards !) neutrinos émis ainsi par le Soleil traversent votre corps chaque seconde sans avoir le moindre effet sur vous. On peut détecter ces neutrinos à l'aide d'instrument enfoui profondément sous Terre. Ils sont à cet endroit pour s'assurer que toutes les autres particules arrivant de l'espace (il y en a beaucoup) soient bloquées par le sol et que seuls les neutrinos puissent arriver au détecteur. L'image montre un de ces détecteurs situés dans une ancienne mine à Sudbury. (C'est assez gros : remarquez le bonhomme en bas à gauche.)



[en.wikipedia.org/wiki/Queen's\\_University](http://en.wikipedia.org/wiki/Queen's_University)

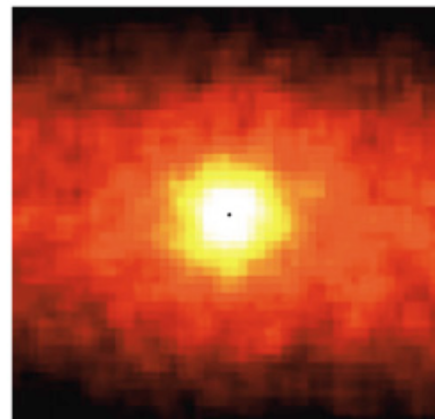
Puisque les neutrinos interagissent très peu avec la matière, le détecteur en capte très peu. Bien qu'il soit traversé par des milliards de milliards de neutrinos chaque seconde, le détecteur en capttera en moyenne un seul par jour. Par contre, c'est suffisant pour qu'on puisse faire quelques vérifications. Comme on peut calculer la probabilité de capter les neutrinos, on peut déduire le flux de neutrino reçu par la Terre à partir du rythme avec lequel on capte des neutrinos.

Initialement, on était inquiet, car on calculait que le flux reçu n'était que le tiers de celui prévu théoriquement. Heureusement, on a découvert que les neutrinos pouvaient changer de type (il y a trois types de neutrinos) pendant leur parcours vers la Terre et qu'on avait donc trois fois plus de neutrinos que ce qu'on pouvait déduire à partir des mesures du capteur qui ne détectait qu'un seul type de neutrino. Ainsi, on calcule qu'on reçoit exactement le nombre de neutrinos prévu par la théorie de la fusion nucléaire dans le Soleil. C'est bon signe.

Les détecteurs de neutrinos sont de plus en plus performants, à tel point qu'on peut maintenant déduire la direction d'arrivée du neutrino. Cela permet de déterminer d'où proviennent les neutrinos et de faire une carte montrant d'où ils arrivent. C'est un peu comme si on avait un télescope avec lequel on peut obtenir une image non pas à partir de la lumière, mais à partir des neutrinos.

Voici d'ailleurs l'image obtenue pour le Soleil.

Pour l'instant, ces images ont très peu de résolution. Le point noir au centre de l'image est la dimension du Soleil sur cette image. L'image nous indique donc que les neutrinos reçus par les détecteurs semblent effectivement provenir du Soleil, mais c'est à peu près tout ce qu'on peut dire pour l'instant.



[apod.nasa.gov/apod/ap980605.html](http://apod.nasa.gov/apod/ap980605.html)

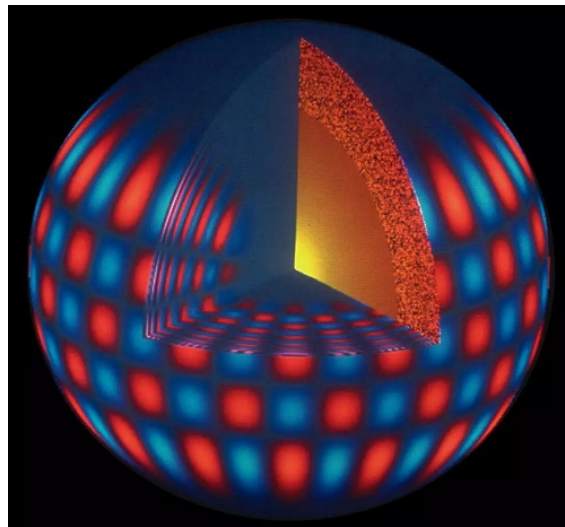
## 4.10 LA STRUCTURE DU SOLEIL

Examinons maintenant la structure interne du Soleil. On pourra alors savoir, par exemple, où se fait la fusion nucléaire dans le Soleil. Pour cela, on doit déterminer les lois qui régissent une grosse boule de gaz comme le Soleil. Pour arriver à une structure réaliste pour le Soleil, il faut combiner les informations suivantes :

- 1) L'équation de l'équilibre hydrostatique entre la force gravitationnelle et la force de pression.
- 2) La loi des gaz. (Tout en tenant compte de la variation de composition générée par la fusion de l'hydrogène en hélium, ce qui change le lien entre la densité et  $n/V$ .)
- 3) Les équations du transport de la chaleur dans le gaz.
- 4) Les équations de la fusion nucléaire pour déterminer la quantité de chaleur générée selon la densité et la température.
- 5) Les équations de la magnétohydrodynamique décrivant le mouvement du gaz en tenant compte de la présence du champ magnétique créé par ce mouvement de matière. Ces équations sont très complexes.

À partir de tous ces éléments, on peut faire un modèle de l'intérieur du Soleil. C'est loin d'être évident puisqu'il est impossible de résoudre exactement ces équations. Le plus souvent, il s'agit de modèles faits à l'aide de puissants ordinateurs. Ces modèles sont approximatifs, car il est très difficile de prendre en compte tous les éléments qui peuvent influencer la structure du Soleil.

Notez qu'on peut vérifier et améliorer les modèles expérimentalement grâce à *l'héliosismologie* qui consiste à étudier les faibles oscillations du Soleil. Comme la période de ces oscillations dépend de la structure interne du Soleil, on peut trouver plusieurs données importantes concernant la structure interne du Soleil avec ces oscillations. La figure de droite montre un de ces modes d'oscillation du Soleil.



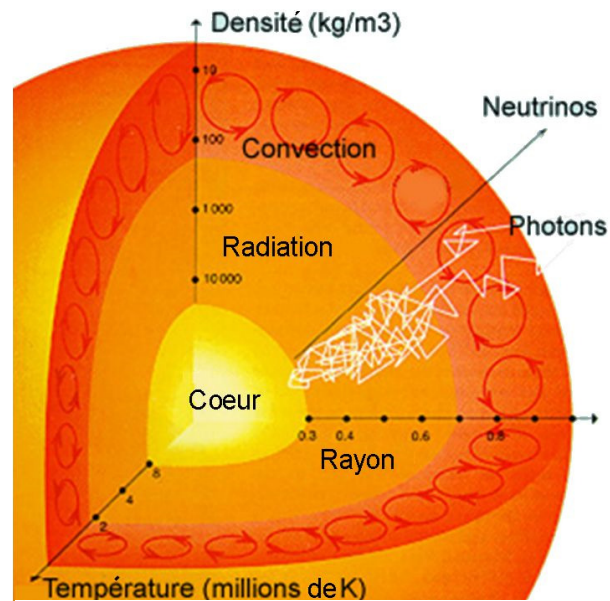
[essentialhomme.net/helioseismology-exploration-of-solar-interior/](http://essentialhomme.net/helioseismology-exploration-of-solar-interior/)

## La zone de fusion nucléaire et les zones de radiation et de convection

Les modèles indiquent qu'il y a 3 zones distinctes dans le Soleil.

### Le cœur

Au centre de l'étoile, il y a le cœur de l'étoile. C'est à cet endroit que la densité et la température de l'étoile sont assez grandes pour qu'il y ait des réactions nucléaires. Le cœur s'étend jusqu'à  $0,25 R_{\odot}$ , ce qui veut dire qu'il constitue 1,6 % du volume du Soleil. Malgré son faible volume, le cœur contient 40 % de la masse du Soleil puisque sa densité est phénoménale, comme on pourra le constater plus loin.



[stargazingmadesimple.wordpress.com/2008/11/24/the-sun/](http://stargazingmadesimple.wordpress.com/2008/11/24/the-sun/)

### La zone radiative

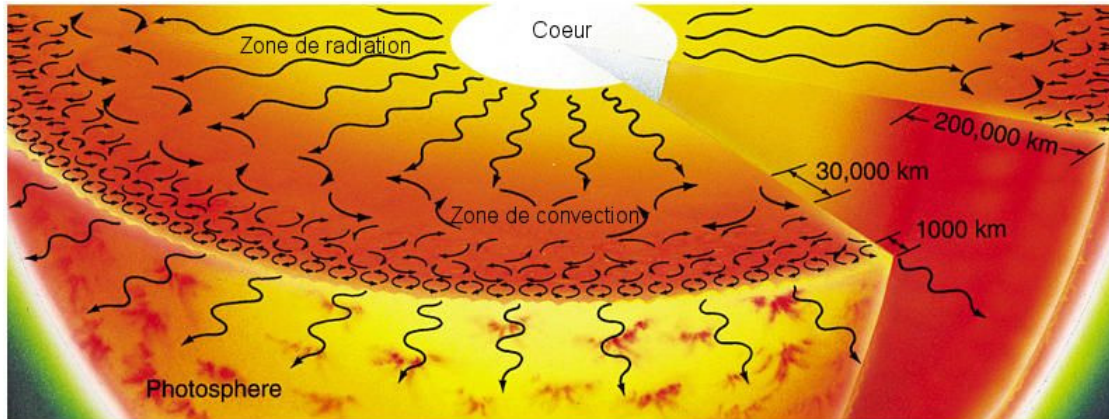
Vient ensuite une zone radiative qui va de  $0,25 R_{\odot}$  à  $0,72 R_{\odot}$ . Dans cette zone, la chaleur produite au centre du Soleil se propage par radiation. Autrement dit, l'énergie produite se propage sous forme de photons qui se déplacent dans la matière. Ces photons interagissent fortement avec la matière de sorte qu'un photon parcourt en moyenne environ 1 cm avant d'être absorbé ou dévié par un atome. Il faut beaucoup de temps pour qu'un photon traverse cette zone, car il est constamment absorbé et réémis ou simplement dévié dans toutes les directions. Cela veut dire qu'il va vers le centre du Soleil presque aussi souvent qu'il va vers l'extérieur du Soleil. En gros, le photon fait du surplace, mais en dérivant lentement vers l'extérieur. Il faut en moyenne 200 000 ans pour qu'un photon parti du cœur arrive au bord de la zone radiative.

### La zone de convection

Finalement, il y a une zone de convection allant de  $0,72 R_{\odot}$  jusqu'à la surface. Dans une zone de convection, la chaleur est transportée par de gigantesques mouvements de tourbillons de la matière. Dans cette zone, le transport de chaleur se fait beaucoup plus rapidement puisque le déplacement de matière entraîne les photons avec elle. Il faut en moyenne 2 mois pour qu'un photon traverse cette zone.

En fait, la zone de convection n'est pas simplement formée de grosses cellules de convection transportant directement la matière d'un côté à l'autre de la zone de convection.

Il y a plutôt toute une série de cellules de convection et la taille des cellules diminue à mesure qu'on s'approche de la surface du Soleil. Les cellules les plus profondes auraient un diamètre de l'ordre de 30 000 km, alors que les cellules près de la surface, qu'on peut voir à la surface du Soleil, ont un diamètre de l'ordre de 1000 km.



[physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121/notes/chapter15.html](http://physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121/notes/chapter15.html)

Ce résultat correspond aux observations. La présence de granules à la surface du Soleil indiquait clairement qu'il y a une zone de convection atteignant la surface du Soleil. Ces granules correspondent aux dessus des petites cellules de convection près de la surface.

## La température, la densité et la pression à l'intérieur du Soleil

Le tableau suivant vous donne les valeurs de la température, de la densité et de la pression dans le Soleil en fonction de la distance obtenue avec les modèles théoriques.

Distance de centre	Température K	Densité kg/m <sup>3</sup>	Pression Pa
0 $R_{\odot}$	15 670 000	152 900	$2,36 \times 10^{16}$
0,1 $R_{\odot}$	13 100 000	87 600	$1,36 \times 10^{16}$
0,2 $R_{\odot}$	9 400 000	35 300	$4,39 \times 10^{15}$
0,3 $R_{\odot}$	6 700 000	11 700	$1,10 \times 10^{15}$
0,4 $R_{\odot}$	5 100 000	3 900	$2,69 \times 10^{14}$
0,5 $R_{\odot}$	4 000 000	1 300	$7,20 \times 10^{13}$
0,6 $R_{\odot}$	3 100 000	500	$2,13 \times 10^{13}$
0,7 $R_{\odot}$	2 300 000	210	$6,55 \times 10^{12}$
0,8 $R_{\odot}$	1 400 000	90	$1,69 \times 10^{12}$
0,9 $R_{\odot}$	600 000	26	$2,11 \times 10^{11}$
1 $R_{\odot}$	5 770	0,000 2	$1,00 \times 10^4$

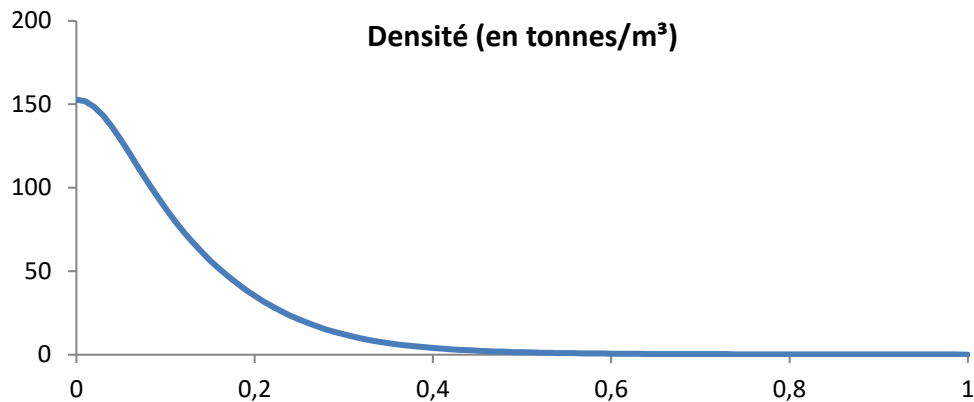
(Ces valeurs sont basées sur le modèle BS2005-OP. Même si les modèles de l'intérieur du Soleil se raffinent continuellement, il y a peu de chance que ces valeurs changent radicalement.)



On voit qu'au centre du Soleil, la température atteint 15 670 000 K. La densité du gaz est aussi très grande puisqu'elle atteint 152 900 kg/m<sup>3</sup>, soit 152,9 fois celle de l'eau (rappelez-vous qu'on parle d'un gaz ici). Avec une telle température et une telle densité, la pression est de  $2,36 \times 10^{16}$  Pa.

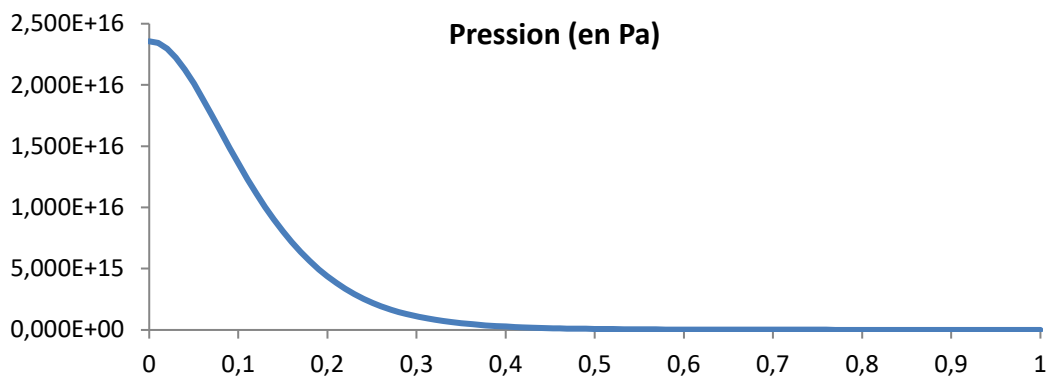
Les graphiques suivants vous montrent la température, la densité et la pression à l'intérieur du Soleil à partir du centre (les distances sont en rayons solaires).

### Densité



La baisse rapide de la densité fait que 90 % de la masse du Soleil est à moins de  $0,5 R_{\odot}$  du centre du Soleil.

### Pression



Ce résultat est en accord avec l'équilibre des forces dans le Soleil. Pour comprendre ce que cela signifie, séparons l'étoile en deux parties telles qu'illustrées sur la figure. Ces deux parties de l'étoile seront les parties externe et interne.

Examinons les forces sur la partie externe de l'étoile.

Il y a premièrement une force gravitationnelle ( $F_g$ ). C'est la force d'attraction gravitationnelle faite par la partie interne de l'étoile et elle est donc dirigée vers le centre de l'étoile.

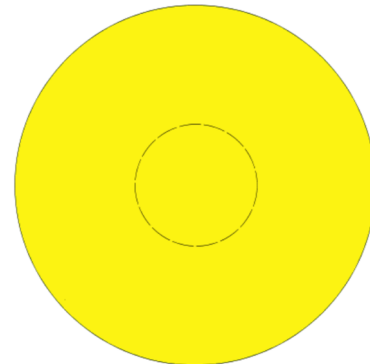
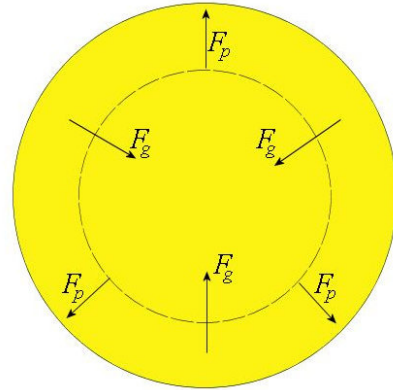
Il y a ensuite la force de pression du gaz de la partie interne ( $F_p$ ). Cette pression pousse vers l'extérieur sur la partie externe de l'étoile.

À l'équilibre, ces deux forces doivent s'annuler. C'est donc la force de pression du gaz qui s'oppose à la force gravitationnelle qui cherche à faire contracter l'étoile.

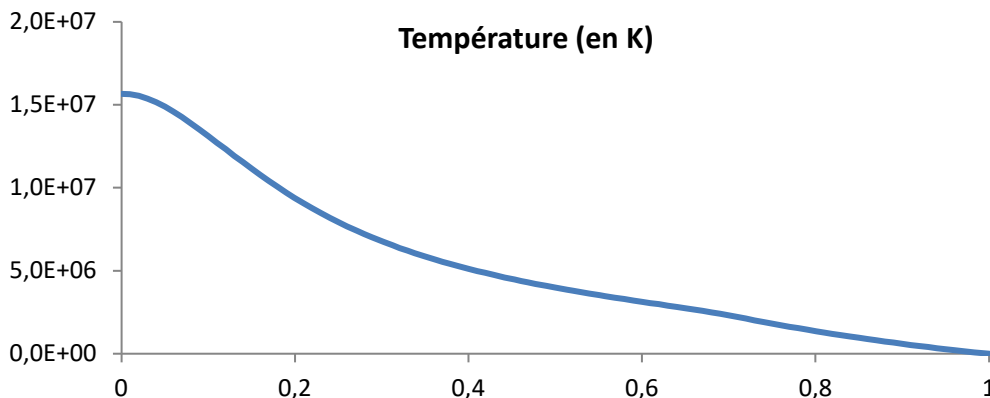
On doit toujours avoir cet équilibre, peu importe l'endroit où on fait la séparation entre la partie externe et interne. Par exemple, imaginons que la séparation entre la partie externe et interne est plus près du centre du Soleil.

Dans ce cas, la force de gravitation sera sûrement plus grande parce qu'on a ajouté de la masse à la partie externe et la force de gravité de cette nouvelle masse vient s'ajouter à celle qu'on avait déjà avec une partie externe plus petite. Si les forces de gravitation et de pression sont égales et que la force de gravitation est plus grande, alors la force de pression à l'endroit où on a fait la séparation doit être plus grande que celle qu'on avait quand la couche externe était plus mince. La force de pression doit donc être plus grande à cet endroit.

Cela nous amène à conclure que la pression doit augmenter à mesure qu'on s'approche du centre de l'étoile pour que la force de pression puisse contrebalancer les forces de gravitation exercées par les couches externes de l'étoile. C'est effectivement ce qu'on peut observer sur le graphique de la pression.



Température

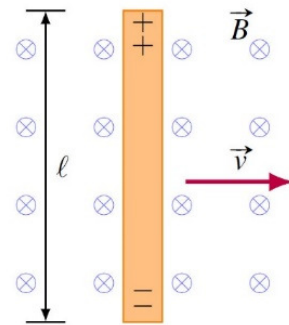


## 4.11 L'ORIGINE DU CHAMP MAGNÉTIQUE SOLAIRE

On a vu que pour faire un champ magnétique, on doit avoir de la matière conductrice qui fait de la convection. Dans le Soleil, c'est exactement ce qu'on a entre  $R = 0,72 R_{\odot}$  et la surface. La matière en convection est principalement constituée d'hydrogène et d'hélium. Normalement, ces gaz ne conduisent pas l'électricité, mais ils le deviennent à des températures dépassant 3000 K (environ). À ces températures, le gaz devient ionisé et on a maintenant une mixture d'électrons (négatifs) et de noyaux atomiques (positifs) libres qui peuvent conduire l'électricité.

Rappelez-vous que le champ magnétique et les gaz ionisés sont comme fixés l'un dans l'autre. Si la matière se déplace, le champ doit suivre le déplacement de la matière. Si le champ se déplace, la matière doit suivre ce déplacement. Le seul déplacement de matière possible est un déplacement de la matière le long des lignes de champ magnétique.

Tout comme pour la Terre, on a un champ parce qu'il apparaît une séparation de charge quand un conducteur se déplace dans un champ magnétique. Cette séparation de charge est générée par la force magnétique qui agit sur les particules chargées dans la matière. La séparation de charge qui apparaît peut alors créer des courants dans la matière environnante et ces courants génèrent des champs magnétiques. Évidemment, le champ qui apparaît pour s'ajouter ou se soustraire au champ magnétique déjà présent. Pour obtenir un champ qui persiste dans le temps, il faut, en moyenne, générer un peu plus de champ qui s'ajoute au champ déjà présent que de champ opposé au champ déjà présent.



On peut donc tenter de modéliser ce champ en étudiant les mouvements de matière dans la zone de convection. Évidemment, la complexité de la zone de convection rend cette modélisation très difficile. Le mouvement de la matière génère des courants et des champs magnétiques qui, à leur tour, influencent les mouvements de matière et les séparations de charges produites. Aucun ordinateur ne peut modéliser un tel système sans faire quelques simplifications et approximations. C'est comme les modèles utilisés pour faire les prévisions météorologiques sur Terre ; ça reste une approximation parce qu'aucun de ces modèles ne calcule en détail les mouvements de chaque petit morceau de matière.

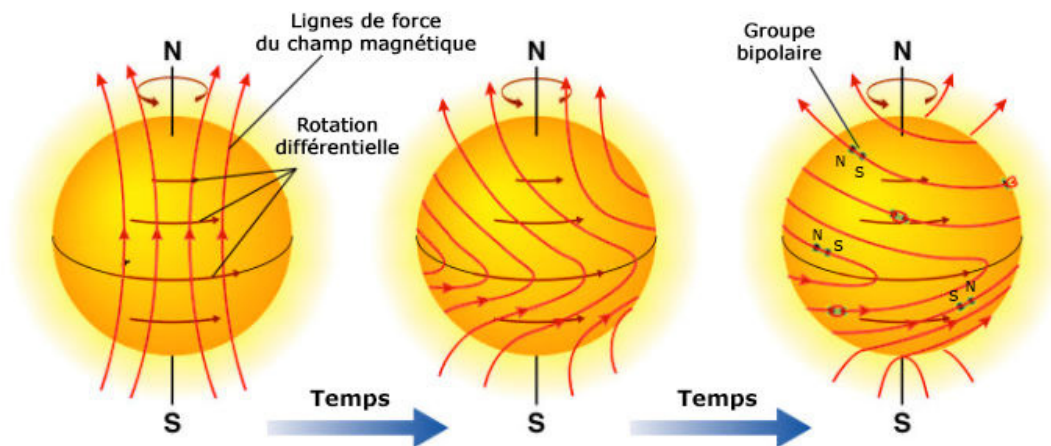
Pour qu'un modèle soit satisfaisant, il doit parvenir à expliquer tous ces phénomènes :

- 1) L'inversion du champ tous les 11 ans et au bon moment dans le cycle.
- 2) Les variations de positions des taches solaires en fonction du temps (les tâches apparaissent de plus en plus près de l'équateur à mesure que le cycle avance)
- 3) La différence de latitude des tâches nord et sud (les tâches apparaissent toujours en groupe de 2, une nord et une sud, et celle qui devance est plus près de l'équateur.)

Pour l'instant, aucun modèle ne parvient à parfaitement reproduire les observations et ces modèles utilisent encore beaucoup d'approximations et d'ajustements ajoutés simplement pour arriver à quelque chose qui ressemble aux observations. Toutefois, les modèles deviennent de plus en plus performants.

En gros, voici ce qu'on croit qui se passe dans un cycle solaire. Disons que pour commencer, on a un nord magnétique au pôle nord du Soleil et un sud magnétique au pôle sud du Soleil.

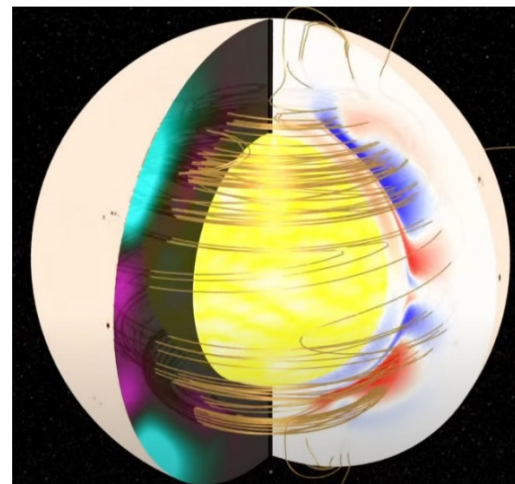
Comme le champ et le gaz doivent se suivre dans un plasma, le champ va lentement s'entortiller. On a vu que la période de rotation varie avec la latitude, avec une période de rotation allant de 25,38 jours à l'équateur à 34,4 jours aux pôles. Cette rotation entraîne avec elle le champ magnétique et l'étire de plus en plus. Au départ, les lignes de champ sont bien droites en allant d'un pôle à l'autre (ce qu'on appelle un *champ poloïdal*). Comme l'équateur tourne plus vite que les pôles, ces lignes de champ se déformeront pour s'enrouler autour du Soleil. Lentement, le champ s'entortille autour du Soleil et devient de plus en plus parallèle à l'équateur (ce qu'on appelle un *champ toroïdal*). La figure suivante vous montre comment évolue le champ magnétique du Soleil en fonction du temps.

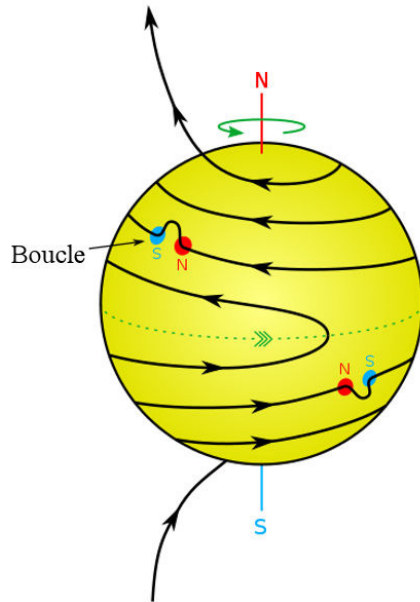


[www.astrosurf.com/luxorion/sysol-soleil-magnetique.htm](http://www.astrosurf.com/luxorion/sysol-soleil-magnetique.htm)

Cela rapproche les lignes de champ les unes des autres, ce qui signifie que l'intensité du champ augmente de plus en plus (en 10 ans, il devient environ 100 fois plus fort que quand le champ est poloïdal). Notez que ce champ est situé assez loin sous la surface du Soleil (image de droite), près de la base de la zone de convection.

[www.youtube.com/watch?v=sASbVkk-p0w](https://www.youtube.com/watch?v=sASbVkk-p0w)



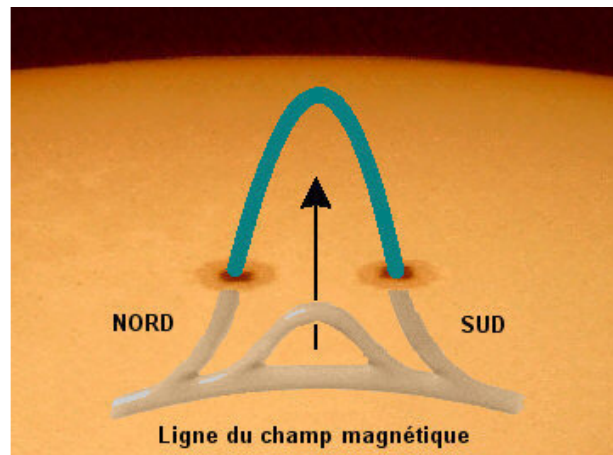


Quand le champ devient très entortillé, il se forme des boucles de champ magnétique qui montent pour atteindre la surface du Soleil, comme on peut le voir sur la figure de gauche. On appelle ces boucles des *groupes bipolaires* parce qu'on a un côté de la boucle qui est un pôle nord magnétique (du côté où la boucle sort de la surface) et un côté qui est un pôle sud magnétique (du côté où la boucle entre dans la surface).

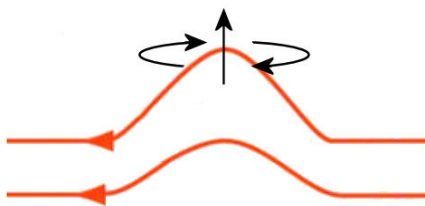
On a vu au chapitre précédent que les points d'entrée et de sortie de ces boucles à la surface correspondent aux taches solaires.

[commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun%27s\\_magnetic\\_field\\_after\\_omega\\_effect.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun%27s_magnetic_field_after_omega_effect.svg)

Pour comprendre pourquoi il se forme de telles boucles, il faut savoir que le champ magnétique exerce aussi une certaine pression. Ainsi, aux endroits où le champ magnétique est très fort, cette pression faite par le champ magnétique sera compensée par une pression de matière plus faible, ce qui implique que la densité de la matière est alors plus petite. Cette matière moins dense subit alors une poussée d'Archimède vers le haut, ce qui amène la matière et les lignes de champ (qui doit suivre le mouvement de la matière) à sortir du Soleil et à former des boucles de champ magnétique au-dessus de la surface du Soleil. C'est l'entortillement du champ par la rotation différente selon la latitude qui fait augmenter l'intensité du champ jusqu'à ce que la pression magnétique soit assez grande pour que des tubes de champ et de matière commencent à s'élever vers la surface et former des boucles.



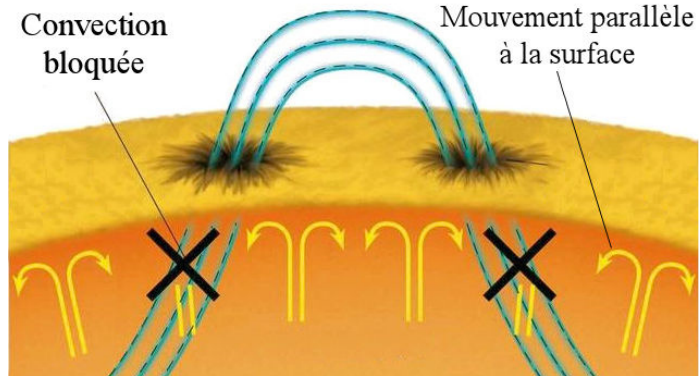
[www.astrosolaire.sitew.ca/Photosphere.C.htm](http://www.astrosolaire.sitew.ca/Photosphere.C.htm)



En se déplaçant vers la surface, la matière subit une déviation produite par la rotation du Soleil sur lui-même (qu'on appelle la force de Coriolis). Cela va entraîner une torsion du tube qui monte. C'est cette torsion qui va faire en sorte que la tache solaire qui devance sera plus près de l'équateur.

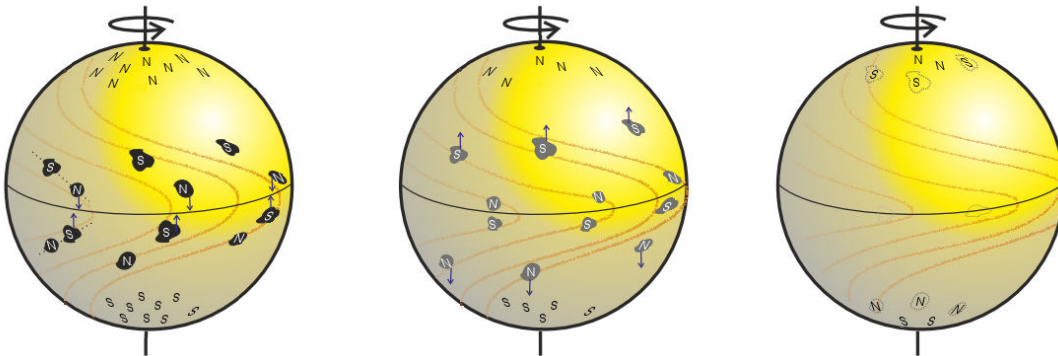


On peut maintenant comprendre pourquoi les taches sont plus froides que le reste de la surface du Soleil. Les taches sont plus froides parce que le champ magnétique intense des taches empêche la matière de se déplacer parallèlement à la surface du Soleil. Ce mouvement parallèle à la surface est essentiel pour que la convection forme des boucles. Si on bloque ce mouvement parallèle à la surface, il n'y a plus de boucles et donc plus de convection. Sans convection, la chaleur n'est plus transportée vers la surface et cela diminue la température.



[universe-review.ca/F08-star05a.htm](http://universe-review.ca/F08-star05a.htm)

Finalement, comme on l'a vu au chapitre précédent, les zones de polarité sud de ces boucles vont se déplacer vers le nord magnétique du Soleil dans l'hémisphère nord et les zones de polarité nord de ces boucles vont se déplacer vers le sud magnétique du Soleil dans l'hémisphère sud.



[www.astro.umontreal.ca/~paulchar/nicolas/Extraits-Nicolas.pdf](http://www.astro.umontreal.ca/~paulchar/nicolas/Extraits-Nicolas.pdf)

Lentement, le champ toroïdal se retransforme en champ poloïdal, mais avec une polarité inversée par rapport à ce qu'on avait au début du cycle.

Notez que les zones de polarités qui migrent vers les pôles pour inverser le champ perdent beaucoup d'intensité pendant leur déplacement. Malgré cette dissipation, la quantité de lignes de champ qui arrivent aux pôles est amplement suffisante pour inverser les pôles. En fait, le nombre de lignes de champ qui apparaissent dans les taches est, en gros, 100 fois plus grand que le nombre de lignes nécessaire pour inverser le champ. On peut donc en perdre pas mal par dissipation et quand même avoir une inversion du champ.

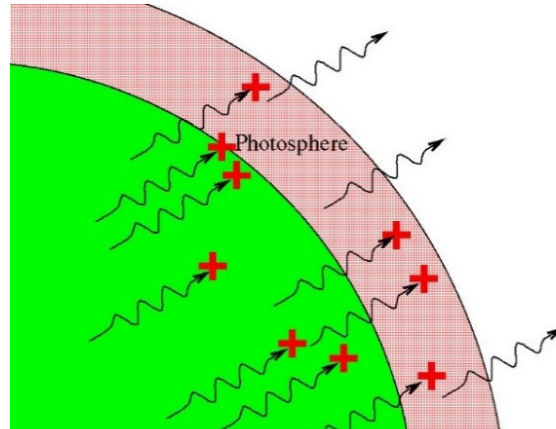
Une fois que le champ est inversé, le cycle recommence.

Il y a encore beaucoup d'incertitude concernant ce scénario. Il y a d'autres façons de transformer le champ toroïdal en champ poloïdal et on ne sait pas encore si la migration des zones de polarité vers les pôles est la cause de l'inversion ou un effet de l'inversion.

## 4.12 LA PHOTOSPHÈRE

À première vue, on pourrait penser que la surface du Soleil correspond simplement à l'endroit où il n'y a plus de matière comme pour une planète, mais c'est un peu plus compliqué que cela.

La lumière du Soleil qui arrive sur Terre provient de la photosphère. La photosphère est une mince couche à la surface du Soleil. Si un photon se dirige vers la Terre en partant d'un endroit sous la photosphère, il n'a pratiquement aucune chance de pouvoir sortir du Soleil sans interagir avec une particule dans le Soleil. S'il commence son voyage dans la photosphère, il a de bonnes chances de pouvoir arriver jusqu'à la Terre sans interagir avec la



[www.gloomy-grim.info/photosphere-meaning/](http://www.gloomy-grim.info/photosphere-meaning/)

matière du Soleil. C'est ce que montre la figure de droite. Tous les photons qui commencent leur trajet vers la Terre sous la photosphère finissent par être absorbés ou déviés de leur trajectoire par une interaction avec la matière (croix rouge). Les photons qui partent de la photosphère ont une chance de pouvoir sortir du Soleil pour atteindre la Terre. Comme les photons qui arrivent sur Terre proviennent de cette région, c'est à cet endroit qu'on voit la surface du Soleil.

Certains photons proviennent d'un peu plus creux dans le Soleil. Plus les photons partent profondément dans la photosphère, moins ils ont de chance de sortir sans interagir. Le tableau suivant donne la probabilité de sortir du Soleil selon la profondeur dans la photosphère.

Profondeur (km)	Chance de sortir sans interagir (%)
100	97
200	89
250	80
300	64
350	37
375	18
400	4

La « surface » du Soleil n'est donc pas une surface bien délimitée, c'est plutôt une zone qui s'étend sur près de 500 km d'épaisseur. Toute la lumière émise par le Soleil provient de cette mince couche. Si cette épaisseur était beaucoup plus grande, la surface nous semblerait un peu floue.