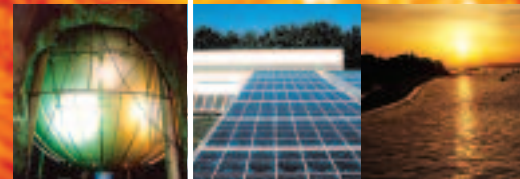


- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène
- 13 → Le Soleil
- 14 → Les déchets radioactifs
- 15 → Le Climat
- 16 → La simulation numérique
- 17 → Les séismes
- 18 → Le nanomonde



DE LA RECHERCHE
À L'INDUSTRIE

13 → Le Soleil



NOTRE ÉTOILE
VOYAGE AU CENTRE DU SOLEIL
LE SOLEIL DOMESTIQUÉ



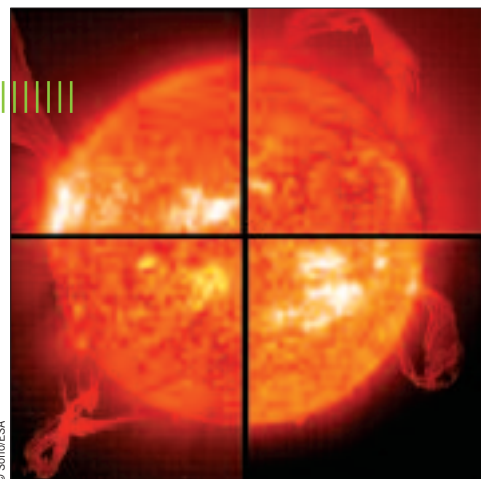
© Commissariat à l'Énergie Atomique, 2009
Direction de la communication
Bâtiment Siège - 91191 Gif-sur-Yvette cedex
www.cea.fr

ISSN 1637-5408.



Le Soleil

NOTRE ÉTOILE	4
Une étoile est née	5
Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?	6
Quelle énergie !	6
Le Soleil, réacteur nucléaire de fusion auto-régulé	9
VOYAGE AU CENTRE DU SOLEIL	11
Topographie solaire : la partie opaque	12
La partie visible	14
Dans la couronne et au-delà : les colères du Soleil	16
Le plasma solaire	17
Carte d'identité du Soleil	18
Comment ça marche ?	21
Héliosismologie et simulation	23
Mesurer l'activité du cœur à la couronne solaire	24
LE SOLEIL DOMESTIQUÉ	26
L'énergie solaire thermique	27
L'énergie solaire photovoltaïque	29



© Soho/ESA

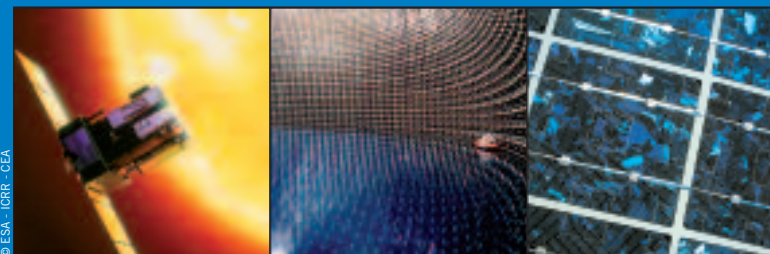
Montage de plusieurs vues d'éruptions solaires.



© Siemens Solar

Quand l'énergie solaire alimente une cabine téléphonique...

© ESA - IDRR - CEA



De gauche à droite : le satellite Soho, un détecteur de neutrinos au Japon, une cellule photovoltaïque.

“Depuis 4,6 milliards d'années, le Soleil nous apporte lumière et chaleur, aujourd'hui l'homme a pour ambition de maîtriser cette source d'énergie.”

Astre et divinité, le Soleil a longtemps été considéré comme une planète, tandis que le mot “étoile” représentait tout point brillant la nuit dans le ciel. C'est au début du XX^e siècle que son statut d'étoile au sens “d'astre producteur et émetteur d'énergie” a été établi ; les astrophysiciens dévoilent aujourd'hui les secrets de son cœur en fusion. Grâce au Soleil, la vie est apparue et s'est développée sur Terre ; c'est lui qui régit le cycle des saisons, nous apportant lumière et chaleur.

Mais quelles sont la nature et l'origine de cette prodigieuse énergie que l'homme tente de domestiquer pour se chauffer ou produire de l'électricité ?

Que se passe-t-il dans cette gigantesque boule de feu que l'on ne peut observer sans lunettes de protection ?

Enfin, jusqu'à quand notre étoile brillera-t-elle ? Autant de questions qui ont mis des siècles à être résolues et qui alimenteront longtemps encore les travaux de recherche.

L'ASTROPHYSIQUE NOUS APPREND QUE
LE SOLEIL EST UN GIGANTESQUE RÉACTEUR
NUCLÉAIRE.

Notre étoile



© PhotoDisc

UNE ÉTOILE EST NÉE

Le Soleil est une étoile, donc une énorme boule de gaz chaud qui produit de l'énergie et qui rayonne. Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre (150 millions de kilomètres) parmi les milliards d'autres qui appartiennent à la Voie lactée, notre Galaxie, et qui sont distantes de plusieurs années-lumière.

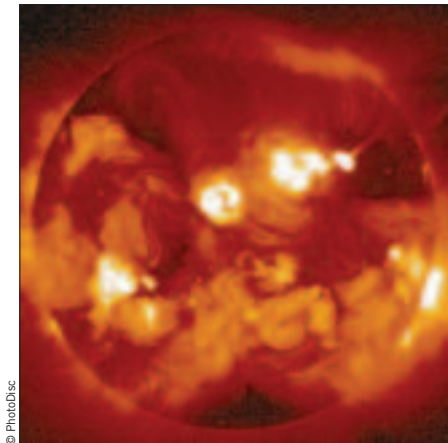
Unité astronomique de longueur correspondant à la distance parcourue par la lumière dans le vide en une année. La vitesse de la lumière dans le vide étant de 300 000 kilomètres par seconde, la lumière émise par le Soleil ne met que 8 minutes à atteindre notre planète tandis que celle provenant de l'autre étoile la plus proche de nous, Proxima du Centaure (éloignée de 4,2 années-lumière de la Terre), met plus de quatre ans.

Malgré ses 700 000 kilomètres de rayon (plus de 100 fois le rayon terrestre) et sa masse 330 000 fois plus importante que celle de la Terre (2 milliards de milliards de milliards de tonnes !), le Soleil est une étoile

relativement petite : par exemple, le rayon de Bételgeuse, située dans la constellation d'Orion, est 1 100 fois supérieur à celui du Soleil.

Mais comment notre étoile est-elle née ?

Le Soleil est né il y a 4,6 milliards d'années d'un nuage interstellaire gigantesque composé d'hydrogène, d'hélium et de moins de 2 % d'éléments plus lourds. Ce nuage s'est fragmenté pour donner, parmi d'autres objets célestes, une étoile entourée de planètes, de comètes et de poussières : le système solaire. Le Soleil fait l'objet de nombreuses études où se rejoignent l'astronomie et la physique dans une discipline appelée astrophysique (voir livret *L'astrophysique nucléaire*, dans la même collection).



© PhotoDisc

La température n'est pas uniforme sur toute la surface du Soleil.

Cette science nous permet de comprendre les phénomènes en action dans l'Univers. Ainsi, nous savons que le Soleil est une énorme condensation de gaz : pourquoi ce gaz chaud ne s'éparpille-t-il pas dans le vide interplanétaire ? Cette cohésion résulte de l'attraction gravitationnelle entre particules de matière qui tend à les rapprocher les unes des autres. Une étoile est donc un corps autogravitant, dont la forme sphérique est imposée par la seule gravitation. Mais si la gravitation tend à rapprocher les particules, pourquoi le Soleil ne s'effondre-t-il pas sur lui-même ? C'est qu'il faut aussi compter sur la pression du gaz stellaire, résultant des collisions et des rebonds incessants des particules les unes sur les autres. Partout, cette pression

“Le déséquilibre de température qui existe au sein du Soleil crée le rayonnement.”

équilibre l'action de la gravité. Si elle venait brutalement à s'annuler, le Soleil s'effondrerait complètement sur lui-même en à peine trois minutes !

QU'EST-CE QUI FAIT BRILLER LE SOLEIL ?

Nous avons tous constaté qu'un gaz comprimé s'échauffe : il suffit de gonfler énergiquement une chambre à air et de toucher ensuite l'extrémité de la pompe à vélo pour s'en apercevoir. La matière stellaire est donc d'autant plus chaude que sa profondeur est grande, puisqu'elle est comprimée par la masse des couches qui

pèsent dessus et agissent comme un piston. Ainsi, plus on s'enfonce vers le cœur de l'étoile, plus la pression augmente et plus il fait chaud : la pression au cœur du Soleil est égale à 200 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre et la température centrale est d'environ 15 millions de degrés. Avec une température de surface frôlant les 6000 °C, le Soleil est donc le siège d'un fort contraste de température résultant de sa propre gravité. Ce déséquilibre de température engendre un transfert de chaleur qui, prélevant l'excès de la région chaude pour le céder à la région froide, tend à l'uniformiser. Affleurant enfin à la surface, ce flux d'énergie thermique s'échappe sous forme de rayonnement puis se dilue dans l'espace interplanétaire : le Soleil brille !

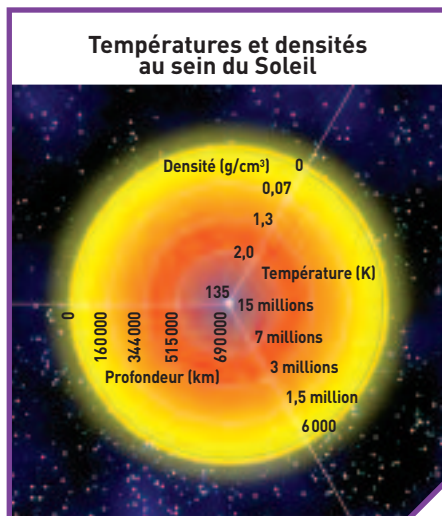
QUELLE ÉNERGIE !

L'énergie rayonnée doit bien être prélevée quelque part : en effet, « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* », disait-il, y a deux cents ans, le grand chimiste Antoine de Lavoisier (1743-1794). Cette affirmation est applicable à la **thermodynamique**.

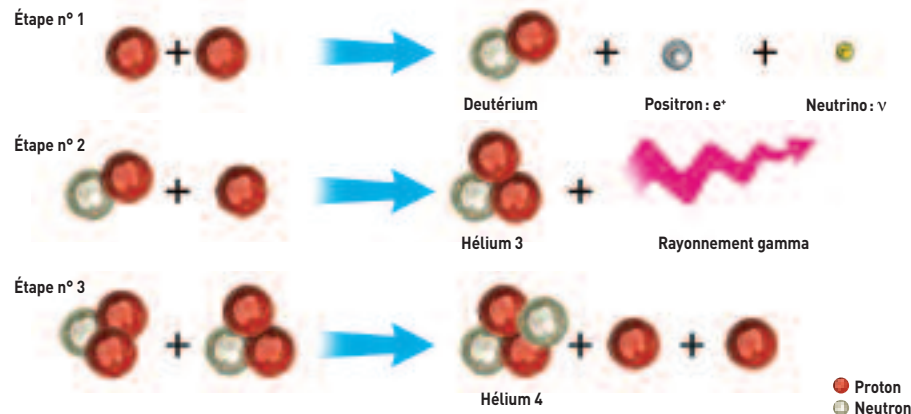
Alors, comment le Soleil entretient-il sa chaleur ?

En effet, s'il se contentait d'émettre passivement sa chaleur sous forme de rayonnement énergétique, il se refroidirait inexorablement et s'éteindrait. Or sa longévité prouve qu'il doit compenser l'hémorragie lumineuse ; nous savons aujourd'hui de quelle façon.

Branche de la physique qui étudie tous les phénomènes dans lesquels interviennent des échanges thermiques.



Transformation de l'hydrogène en hélium dans le Soleil



Comme toute étoile, le Soleil est un gigantesque réacteur nucléaire. En son cœur, des réactions nucléaires de fusion transforment l'hydrogène en hélium en libérant de l'énergie. La température centrale du Soleil est de 15 millions de degrés et la densité est cent cinquante fois celle de l'eau (150 g/cm³).

La transformation de l'hydrogène en hélium est complexe, en voici les étapes les plus courantes :

- Première étape : deux protons interagissent pour former un deuton (noyau de deutérium). Au cours de ce processus, un proton est transformé en neutron en émettant un positron ou électron de charge positive et un neutrino, particule de la même famille que l'électron transportant de l'énergie, mais de masse encore inconnue et très faible.
- Deuxième étape : un deuton se combine avec un proton pour former de l'hélium 3 en libérant de l'énergie sous la forme d'un rayonnement gamma (ou photon).
- Troisième étape : deux noyaux d'hélium 3 fusionnent pour former de l'hélium 4 en éjectant deux protons.

C'est le physicien **Jean Perrin** qui, en 1921, a donné une explication en proposant comme source de production d'énergie les réactions nucléaires, c'est-à-dire les réactions se produisant entre les noyaux des atomes.

Jean Perrin (1870-1942) fut l'un des promoteurs de la théorie atomique et obtint le prix Nobel de physique en 1926 pour ses travaux sur la structure de la matière.

Cette idée a été proposée et développée quelques années plus tard par l'Allemand Hans Bethe qui décrit explicitement les réactions nucléaires se produisant au cœur du Soleil. Le physicien a montré que, pendant la majeure partie de sa vie, l'étoile s'accroît de sa constante perte d'énergie en

puisant dans sa réserve énergétique nucléaire. Dans les régions centrales du Soleil, plus denses et plus chaudes, des réactions de **fusion** transforment quatre noyaux d'hydrogène (protons) en un noyau d'hélium ⁴He, élément qui est particulièrement stable, et libèrent une énergie compensant celle qui s'échappe par la surface. Cette énergie est émise et transportée sous la forme de photons (particules fondamentales sans masse ni charge électrique) et de neutrinos (particules de masse très faible et de charge nulle).

Réaction nucléaire par laquelle deux noyaux légers se combinent pour former un noyau plus lourd. Elle s'accompagne d'une forte libération d'énergie.



Module optique du détecteur de neutrinos Antares.

LES NEUTRINOS

Le centre du Soleil est le siège de réactions de fusion nucléaire qui transforment l'hydrogène en hélium. Le processus produit aussi de fantomatiques particules nommées neutrinos. Au cœur de notre étoile, la température est suffisamment importante pour amorcer la réaction de fusion entre deux protons, première étape d'une chaîne de réactions nucléaires qui aboutissent à la formation d'hélium. Cette réaction produit un noyau de deutérium (isotope de l'hydrogène), un positon, *alter ego* positif de l'électron chargé négativement et, bien sûr, de l'énergie. C'est le physicien suisse d'origine autrichienne, Wolfgang Pauli (1900-1958) qui, pour sauver le principe de conservation de l'énergie, suggère en 1930 de faire intervenir une particule supplémentaire non observée et de masse supposée nulle. Une équipe japonaise apportera en 1998 la preuve expérimentale de l'existence de la masse des neutrinos; cette découverte, brique capitale à l'édifice de la physique des particules, a rapporté à son auteur, Masatoshi Koshiba, le prix Nobel

de physique en 2002. De charge électrique nulle et de masse quasiment nulle (inférieure à 10^{-33} gramme), le neutrino n'interagit que très faiblement avec la matière. Chaque seconde, 65 milliards de neutrinos frappent le moindre centimètre carré de la surface terrestre et presque aucun n'est arrêté! C'est pourquoi on a construit des détecteurs de grande taille, installés soit dans une mine (comme celle de Sudbury, au Canada), sous l'eau (projet Antares en mer Méditerranée), ou encore dans un tunnel (Gran Sasso, sous le Mont-Blanc) pour se protéger des autres rayonnements cosmiques. Une épaisse couverture de terre ou d'eau joue alors le rôle d'un tamis qui ne laisse passer que les particules les plus pénétrantes. Le bilan scientifique de ces expériences est impressionnant car il a permis l'observation des neutrinos émis par la supernova apparue dans le grand nuage de Magellan en 1987 et dont on a pu suivre l'explosion en différé (170 000 ans plus tard!) grâce au télescope spatial Hubble.

LE SOLEIL, RÉACTEUR NUCLÉAIRE DE FUSION AUTO-RÉGULÉ

Une réaction de fusion dégage de l'énergie car la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux initiaux; la différence de masse est transformée en énergie selon la célèbre formule d'Einstein, $E = \Delta m \times c^2$. Ces réactions ne se déclenchent que si la température et la pression

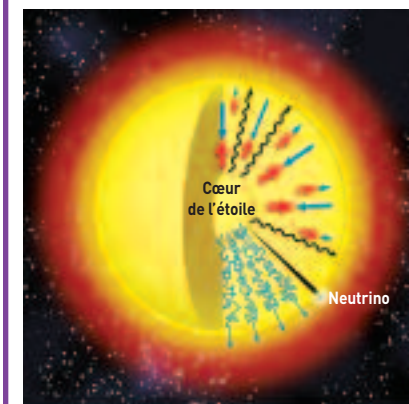
L'énergie produite est égale au produit de la différence de masse par le carré de la vitesse de la lumière.

sont suffisamment élevées pour que deux protons épluchés de leur électron donc de charge positive, fusionnent. Ceci limite leur champ d'action aux régions les plus centrales d'une étoile comme le Soleil. Il faut aussi que l'étoile soit suffisamment massive, plus grosse qu'un dixième de masse solaire, pour comprimer suffisamment le cœur et amorcer les réactions nucléaires. Dans le cœur du Soleil, ce sont 620 millions de tonnes d'hydrogène qui, chaque seconde, sont transformées en 615,7 millions de tonnes d'hélium; la différence est convertie en énergie rayonnée vers l'extérieur. Cette réserve d'énergie nucléaire permet d'estimer la durée de vie du Soleil à environ dix milliards d'années. Par ailleurs, grâce à une mesure de la radioactivité des roches terrestres, nous savons que notre planète et donc le Soleil sont âgés de 4,6 milliards d'années: le Soleil brillera encore pendant 5 milliards d'années! Notons enfin que ces réactions de fusion sont autorégulées. Nous savons alors ce qu'est le Soleil, comme toute autre étoile: c'est un réacteur nucléaire fonctionnant sur le mode de la fusion. Sur Terre, l'homme cherche à maîtriser les réac-

tions de fusion pour exploiter cette fabuleuse énergie. Deux types de procédés sont aujourd'hui étudiés en laboratoire.

- À faible concentration, le mélange gazeux à fusionner est maintenu par des parois immatérielles créées par des champs magnétiques: c'est l'objet du futur réacteur expérimental international ITER **International Thermonuclear Experimental Reactor.**
- À forte concentration, la réaction est amorcée par irradiation avec des faisceaux lasers très puissants: c'est l'objet du laser Mégajoule en construction au centre CEA du Cesta près de Bordeaux ainsi que de son prototype LIL déjà en fonction-

Structure interne du Soleil



- Trajet des photons (hors d'échelle)
- Flux de rayonnement
- Force de pression (dirigée vers l'extérieur)
- Force gravitationnelle (dirigée vers l'intérieur)

“L’héliosismologie étudie les oscillations de la surface du Soleil et permet de sonder l’intérieur de notre astre.”

nement. Celui-ci, accompagné d’un laser de très brève impulsion PETAL, produira des plasmas similaires au plasma solaire mais de très petit volume et permettra l’étude de certains processus cosmiques en laboratoire.

Nous avons vu que le Soleil rayonne de l’énergie : la Terre n’en reçoit qu’une toute petite partie qui représente tout de même 178 milliards de millions de watts ! La fusion thermonucléaire, génératrice d’énergie, compense la déperdition énergétique de la surface et lui permet de briller durablement ; la contraction a pour effet de l’échauffer en puisant l’énergie nécessaire dans son capital gravitationnel. En réalité, ces deux phénomènes sont liés : comme les ressources nucléaires sont limitées, leur épuisement déclenche la contraction gravitationnelle du cœur. La compression et l’échauffement qui en résultent permettent le démarrage d’un nouveau cycle de fusion qui brûle à une température plus élevée les “cendres” du cycle précédent. C’est ce qui arrive dans les étoiles plus massives que le Soleil : l’hydrogène se transforme en hélium jusqu’à épuisement, puis l’hélium devient combustible à son tour. Il se transformera ainsi en carbone. En suivant ce processus, appelé “nucléosynthèse”, une série d’éléments – carbone, néon, oxygène, silicium – est ainsi créée jusqu’à l’obtention du fer. Nous avons vu que la surface du Soleil émet un rayonnement électromagnétique et que celui-ci met 8 minutes pour arriver sur Terre. Mais cette lumière émise par le cœur, du fait de l’extrême densité du Soleil, a mis plusieurs millions d’années pour atteindre la surface et s’échapper dans

le vide sidéral; elle a donc perdu toute l’information sur ses origines au cœur de l’étoile. C’est pourquoi, les astrophysiciens préfèrent étudier les ondes acoustiques solaires, de même nature que les ondes sismiques et porteuses d’informations sur la structure interne de l’étoile. Ces ondes se propagent de la surface vers le cœur et ne mettent qu’une heure pour parcourir ce trajet, renseignant donc quasiment en direct sur les propriétés microscopiques et macroscopiques internes. Elles se manifestent par des mouvements périodiques à la surface du Soleil et leur étude a donné naissance à une nouvelle discipline qui nous permet de sonder l’intérieur de notre astre : l’héliosismologie.



© CEA

L’INSTRUMENT GOLF

Le CEA a largement contribué à la réalisation du détecteur GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*), instrument d’héliosismologie placé sur le satellite Soho. Cet outil permet une étude détaillée de la structure interne du Soleil par la mesure globale des ondes acoustiques; ses données ont abouti à la détermination de la vitesse du son jusqu’au cœur, lieu des réactions nucléaires, et à la prédiction observationnelle des flux de neutrinos solaires.

PROTUBÉRANCES ET FILAMENTS, ÉRUPTIONS, ÉJECTIONS, GRANULES, TACHES, ATTACHEZ VOS CEINTURES...

Voyage au centre du Soleil



© Soho/ESA/Nasa

Topographie solaire : la partie opaque

La **partie opaque** à la lumière est aujourd'hui abordée par le calcul ou la sismologie.

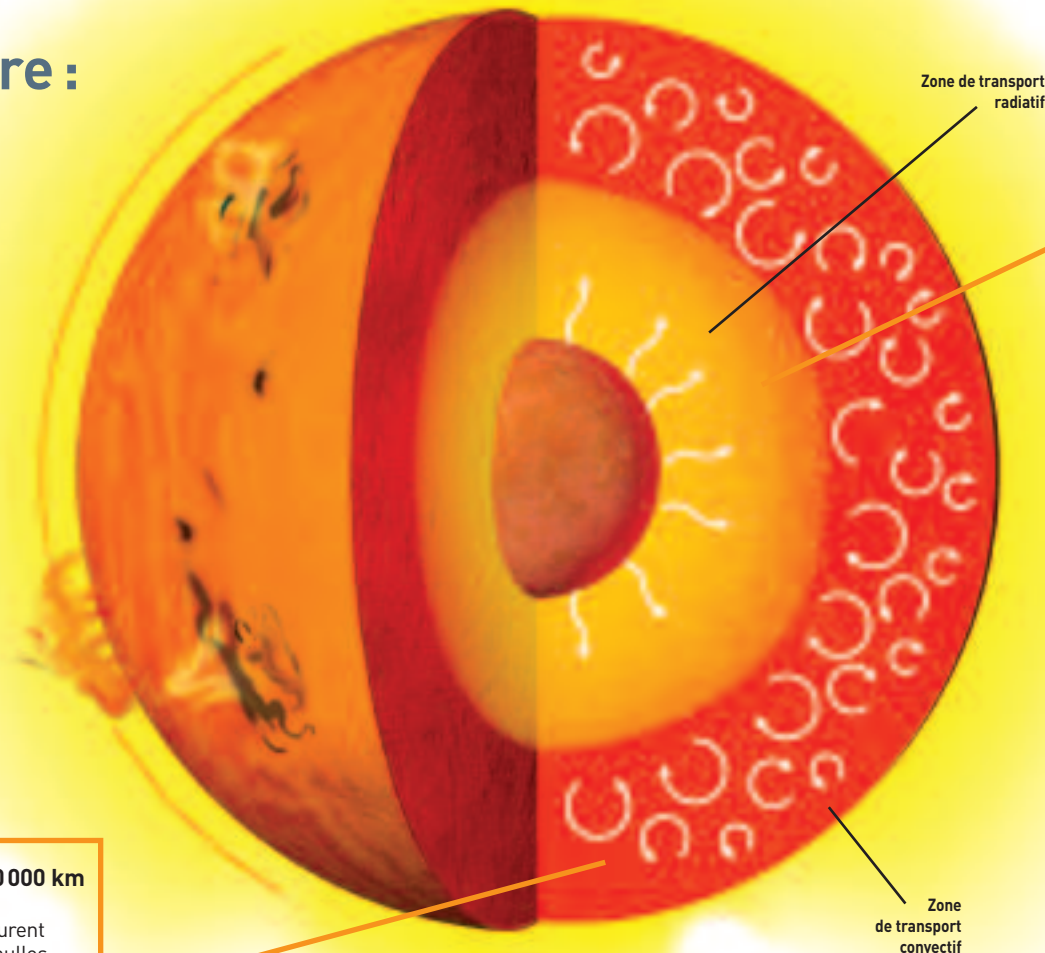
Elle comprend :

- une **zone dite radiative avec un cœur** où les réactions nucléaires transforment les ions hydrogène en hélium ; cœur et zone radiative représentent 98% de la masse du Soleil ;
- une **zone dite convective**, plus externe. Le nom de ces zones est lié au mode de transport de l'énergie, produite dans la partie centrale et évacuée ensuite vers l'extérieur du Soleil. Le transport se fait soit par radiation (propagation sous forme d'ondes électromagnétiques) soit par convection (principe du radiateur électrique: le chauffage entraîne le déplacement des particules, c'est le mouvement de la matière qui assure le transfert de la chaleur).

ZONE CONVECTIVE : de 480 000 à 690 000 km

Elle représente 2% de la masse du Soleil. De turbulents mouvements de plasma assurent le transfert d'énergie vers l'extérieur. Des bulles de matière chaude montent, se refroidissent et redescendent. C'est un transport convectif analogue à celui observé dans une casserole d'eau chaude. Ces mouvements sont à l'origine de la granulation observée sur la photosphère (voir p. 14).

“Le Soleil se divise en deux zones : la partie opaque et la partie visible.”



ZONE RADIATIVE : de 0 à 480 000 km

Partie interne du Soleil, elle englobe le cœur.

LE CŒUR DU SOLEIL : de 0 à 210 000 km

Il représente 50% de la masse du Soleil. Cette région est le lieu des réactions de fusion nucléaire. La température est de 15 millions de degrés au centre, elle diminue quand on s'éloigne du centre. Lorsqu'elle atteint 7 millions de degrés, la chaleur devient insuffisante pour entretenir les réactions de fusion.

Dans cette zone, l'énergie est transportée par radiation. Cette région est le siège de nombreuses interactions entre les photons et les différents éléments présents. Ces collisions avec la matière se traduisent pour les photons par des phénomènes d'absorption-réémission (plusieurs millions de fois) qui les ralentissent et dégradent leur énergie. Le temps de diffusion des photons est très long, de l'ordre du million d'années, alors que la lumière émise depuis la surface ne met que 8 minutes pour atteindre la Terre. La température de sa partie la plus externe est de 2 millions de degrés.

La partie visible

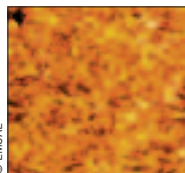
Cette partie du Soleil est observable directement. Elle regroupe la **photosphère** (frontière avec la zone opaque), la **chromosphère** et la **couronne**. Ces deux dernières ne sont visibles que lors d'éclipses totales (naturelles ou artificielles) du Soleil.

LA PHOTOSPHÈRE

Elle contribue pour 99% au rayonnement solaire. Cette surface de quelques centaines de kilomètres est une frontière virtuelle entre l'intérieur du Soleil (zone radiative avec son cœur et zone convective) et son atmosphère (chromosphère et couronne). Sa température est d'environ 6 000 °C.

Granules

L'observation de la photosphère montre des granules dont le centre est plus brillant que le pourtour. Ces zones, d'un diamètre de 1 000 km environ, ont une surface individuelle comparable à celle de la France. Leur durée de vie est de quelques minutes. Cette structure granulaire reflète les mouvements de la matière chaude qui bouillonne dans la zone convective ; la périphérie des granules, plus sombre, correspond à de la matière refroidie. Ce sont des flots descendants qui produisent les ondes acoustiques qui pénètrent jusqu'au cœur du Soleil.



© LMSAL

ZONE DE TRANSITION

Entre la chromosphère et de transition fait apparaître de température jusqu'à un l'extérieur. Cette montée liée à des effets du champ mécanismes complexes sont grâce à de nombreux sate

la couronne, une zone une montée brutale million de degrés vers de température est magnétique. Ces aujourd'hui étudiés lites, dont Soho.

LA COURONNE

La couronne est la couche la plus externe de l'atmosphère du Soleil. Sa température est de l'ordre du million de degrés et sa densité est 100 millions de fois plus faible que celle de la Terre. Elle s'étend jusqu'à des distances égales à plusieurs rayons solaires et se fond dans le milieu interplanétaire. La photosphère est tellement brillante qu'elle empêche d'observer la couronne, sauf lors des éclipses totales du Soleil. En dehors de ces périodes, on utilise des coronographes, dispositifs occultant la lumière du disque de la photosphère.



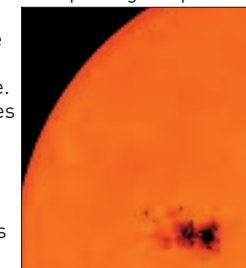
© Digital Vision

Taches solaires

Des régions sombres étendues, les taches solaires, peuvent atteindre plusieurs centaines de milliers de kilomètres de diamètre. Elles apparaissent ou disparaissent en groupe et reviennent régulièrement selon un **rythme** d'environ onze ans. Leur observation

Ce cycle, aujourd'hui appelé cycle solaire, est lié au magnétisme du Soleil dont la polarité des pôles s'inverse tous les onze ans.

permet de mesurer la rotation superficielle du Soleil ; c'est ainsi que Galilée avait découvert, dès 1613, que le Soleil tourne sur lui-même. On sait aujourd'hui que les taches solaires correspondent à des zones traversées par des champs magnétiques de plusieurs milliers de fois le champ magnétique terrestre. Ces champs magnétiques freinent les particules chargées, la température diminue (4 000 °C) et la zone devient plus sombre. La déviation des particules dans ces champs, associée à la création de champs magnétiques locaux, entraîne des mouvements très violents de la matière solaire.



© Soho (ESA/Nasa)

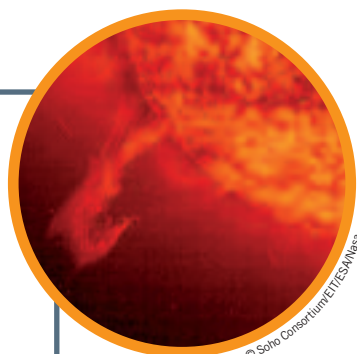
Protubérance

LA CHROMOSPHÈRE

La chromosphère est la partie basse de l'atmosphère solaire ; elle contribue très peu au rayonnement du Soleil. C'est une couche très hétérogène d'une épaisseur moyenne de 2 000 à 3 000 km. Sa température est de plusieurs milliers de degrés et croît vers l'extérieur pour atteindre 20 000 °C. Elle est visible de courts instants lors des éclipses totales. Théâtre d'une intense activité, c'est là que naissent les éruptions solaires, phénomènes violents pouvant se répandre en quelques minutes à des centaines de milliers de kilomètres.

Protubérances et filaments

Les protubérances ou filaments sont des poches de plasma dense et froid (10 000 degrés tout de même !) dans la couronne solaire chaude et diluée. Ces gaz, essentiellement de l'hydrogène, sortent de la surface sous forme de colonnes qui s'éloignent dans l'espace ou reviennent vers la surface du Soleil formant ainsi des boucles. Un champ magnétique intense soulève la matière dense et bloque ses mouvements, conduisant à son refroidissement. Les protubérances peuvent s'élever à des altitudes de plusieurs centaines de milliers de kilomètres.



© Soho Consortium (ESA/Nasa)

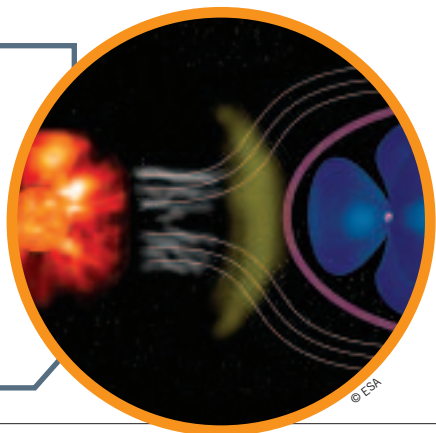
DANS LA COURONNE ET AU-DELÀ : LES COLÈRES DU SOLEIL

Dans les couches élevées de l'atmosphère solaire, peu denses, les particules chargées (ions et électrons) sont sensibles aux forces électromagnétiques. Ces forces peuvent être plus fortes que la gravité et maintenir en altitude de la matière, voire l'éjecter de la couronne pour l'envoyer dans l'espace interplanétaire.

La couronne peut alors présenter des aspects très divers traduisant l'activité magnétique du Soleil : protubérances, éruptions solaires ou trous coronaux.

Vent solaire

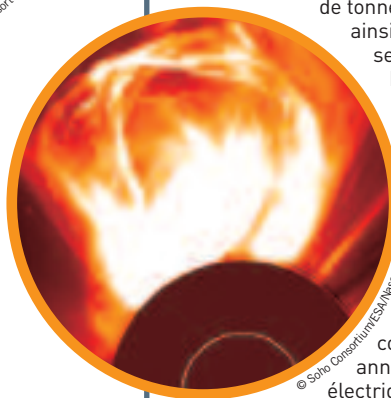
Au-delà d'une certaine distance, les forces gravitationnelles sont insuffisantes pour retenir la matière. Celle-ci s'échappe le long des lignes de champ dans l'espace interplanétaire. C'est le vent solaire. Sa vitesse moyenne est de 400 km/s environ. Elle est plus rapide près des pôles de l'astre qu'à l'équateur.



© ESA

Éruptions solaires ou éjections de matières coronales

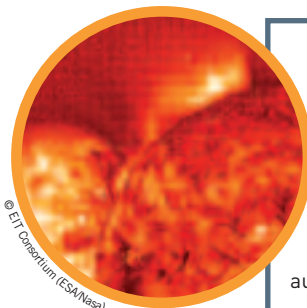
Les éruptions solaires ou éjections de masse coronale ont lieu lorsque les champs magnétiques sont suffisamment forts pour vaincre l'attraction gravitationnelle et éjecter la matière (plasma et gaz neutre) hors de l'atmosphère solaire. Des milliards de tonnes de matière sont ainsi transportées. Elles se caractérisent par la brusque libération d'une énorme quantité d'énergie sous forme de rayonnements (visible, UV, X et radio). L'énergie mise en jeu est considérable, de l'ordre de plusieurs millions de fois la consommation annuelle d'énergie électrique en France.



© Soho Consortium (ESA/Nasa)

Trous coronaux

Les trous coronaux sont des régions moins brillantes et plus froides où le champ magnétique permet l'échappement de matière. Dans ces zones, les lignes de champ magnétique ne reviennent pas vers le Soleil mais s'ouvrent radialement par rapport au Soleil.



© EIT Consortium (ESA/Nasa)

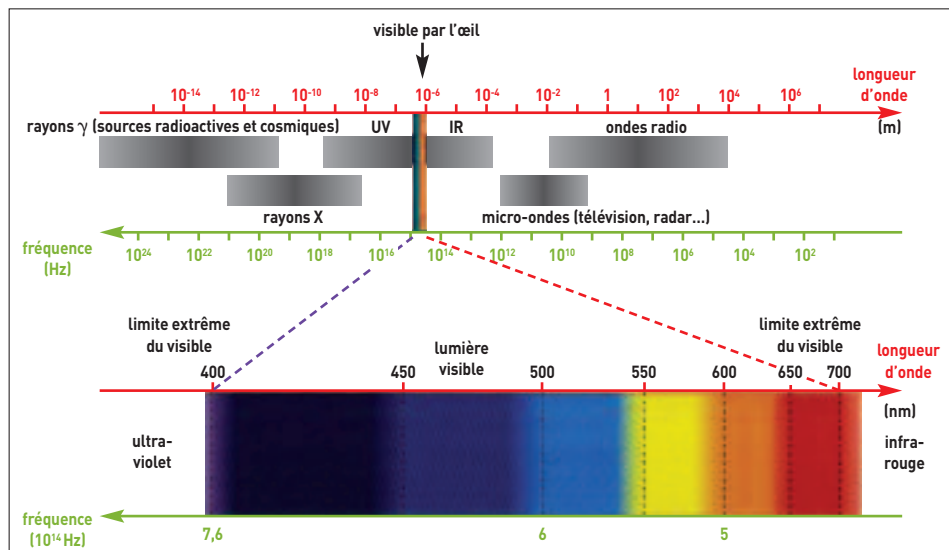
Dans les conditions de température et de pression terrestres, la matière se présente sous trois états : solide, liquide et gazeux. Le passage d'un état à l'autre correspond à une réorganisation des molécules ou des atomes dans la matière. Prenons l'exemple de l'eau : à l'état solide, sous forme de glace, l'eau a une structure très organisée dans laquelle les molécules sont fortement liées les unes aux autres ; sous l'effet de la chaleur, les molécules s'agitent, s'éloignent les unes des autres et l'eau devient liquide ; à plus forte température encore, la structure se désorganise totalement et les molécules d'eau s'éparpillent sous forme de gaz, c'est l'ébullition.

LE PLASMA SOLAIRE

Dans des conditions de température et de pression extrêmes apparaît un nouvel état de la matière dans laquelle la structure atomique elle-même est totalement désorganisée : le plasma.

Au cœur de l'étoile règne une grande agitation parmi les atomes. Ces derniers sont normalement constitués d'un noyau, lui-même constitué de neutrons (de charge électrique neutre) et de protons (de charge électrique positive), accompagné d'un cortège d'électrons (de charge électrique négative). Dans son ensemble, l'atome est électriquement neutre : il comporte autant d'électrons que de protons.

Ce mot est apparu dans les années 1920 avec les travaux sur les gaz ionisés de l'Américain Irving Langmuir, prix Nobel de chimie en 1932. Aujourd'hui, les plasmas sont présents dans notre quotidien avec les écrans de téléviseur à plasma, les torches à plasma ou les tubes au néon.



Les ondes électromagnétiques se répartissent en familles de fréquences et de longueurs d'onde diverses. La répartition de l'énergie des rayonnements se traduit par le spectre électromagnétique qui s'étend, par ordre de longueurs d'onde décroissantes, des ondes hertziennes (radioélectriques) aux rayons gamma, en passant par les micro-ondes, les domaines de l'infrarouge, du visible et de l'ultraviolet, et les rayons X.

À très forte température, l'atome peut perdre ou gagner un ou plusieurs électrons, devenant ainsi un ion chargé, selon le cas, positivement ou négativement.

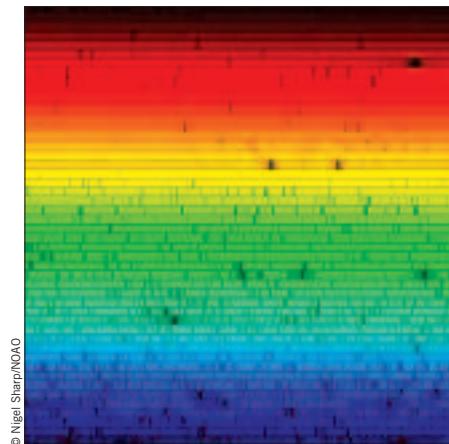
Au cœur du Soleil, l'énergie est suffisante pour arracher leurs électrons aux atomes d'hydrogène, constitués d'un proton et d'un électron. Les atomes d'hydrogène deviennent alors des ions chargés positivement : on les appelle des protons. Le gaz stellaire se présente sous la forme d'un plasma dense, constitué d'atomes ionisés. La quasi-totalité de l'Univers se trouve sous forme de plasma.

Le plasma solaire contient des éléments qui sont dans des états d'ionisation différents selon la température et la densité, du cœur à la pé-

riphérie. Ces variations stratifient le Soleil en plusieurs couches aux comportements très différents. Diverses méthodes expérimentales et théoriques permettent d'étudier le Soleil, sa composition, sa structure et ses propriétés.

CARTE D'IDENTITÉ DU SOLEIL

Pendant longtemps, les informations sur le Soleil n'ont été puisées qu'en sa lumière. Nous savons depuis les travaux d'Isaac Newton (1642-1727) que la lumière qui nous paraît blanche est composée de toutes les couleurs, "de toutes les longueurs d'onde" disent les physiciens. Il suffit de regarder un arc-en-ciel ou d'observer une source lumineuse à travers un prisme pour s'en convaincre. Deux siècles



Le spectre du Soleil présente des raies sombres superposées à un spectre continu.

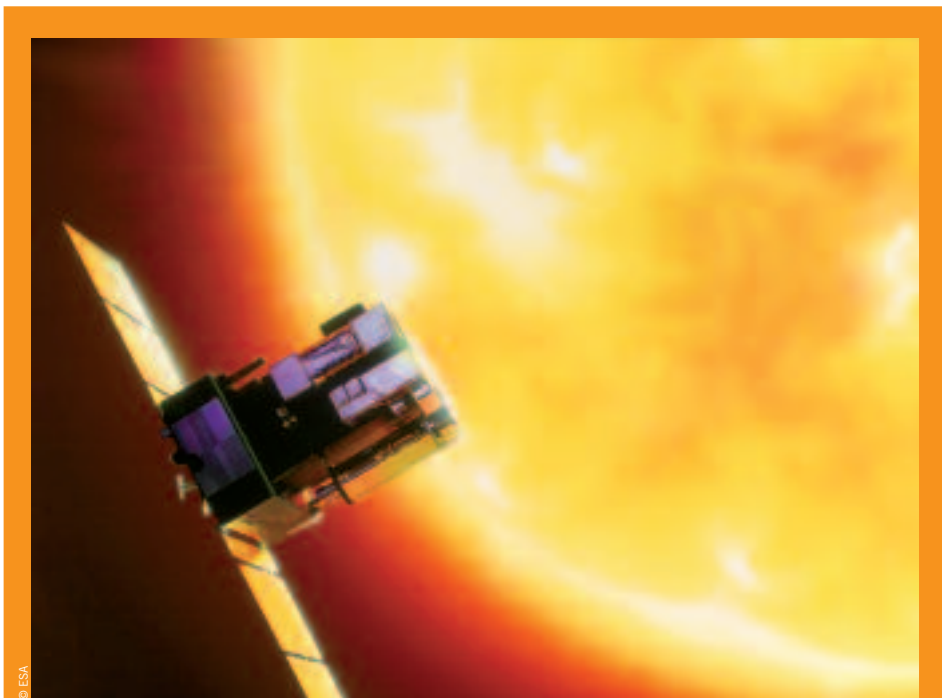
plus tard, la spectroscopie naîtra de cette découverte (voir illustration ci-dessus) : l'arc-en-ciel, "écharpe d'Iris" pour les poètes, est aussi un spectre solaire pour les physiciens ! Le filament de tungstène d'une ampoule est un bon exemple de corps qui, sous l'effet de sa température, émet de la lumière visible dans une gamme étendue de longueurs d'onde : cela donne un spectre d'émission constitué de larges bandes continues.

En 1814, le physicien allemand Joseph von Fraunhofer (1787-1826), fondateur de la spectroscopie, étudiait le spectre du Soleil et y découvrit la présence de raies sombres superposées à un spectre continu ; chacune correspondait à une longueur d'onde particulière.

À l'époque, il n'avait pas les moyens d'interpréter cette curiosité. Les physiciens ont constaté plus tard qu'un gaz, éclairé par une source de lumière blanche, absorbe certaines couleurs. Cette absorption se traduit par l'apparition de raies sombres superposées au spectre électromagnétique : il s'agit d'un spectre d'absorption.

Comment expliquer ce phénomène ? Tout simplement par le fait que l'intensité d'un rayonnement décroît quand il traverse un milieu matériel auquel il transfère une partie de son énergie. Or, à une émission ou à une absorption d'énergie correspond une modification de la structure électronique des atomes concernés ; cela se traduit par une signature spectrale caractéristique de chaque élément. Autrement dit, le spectre constitue la carte d'identité chimique du matériau étudié. Ainsi, c'est à la spectroscopie que l'on doit la découverte, par l'astronome français Jules Janssen (1824-1907), d'un élément inconnu à l'époque sur Terre, l'hélium, dont le nom est dérivé du mot grec "*helios*" désignant le Soleil.

Parmi tous les rayonnements émis par le Soleil, l'atmosphère terrestre ne laisse passer que le visible (avec un peu d'infrarouge et d'UV) et les ondes radio. Il est donc nécessaire, pour mesurer les autres rayonnements (en particulier rayons X et gamma), d'aller au-delà de l'atmosphère terrestre : on utilise alors des instruments embarqués sur des satellites comme Soho.

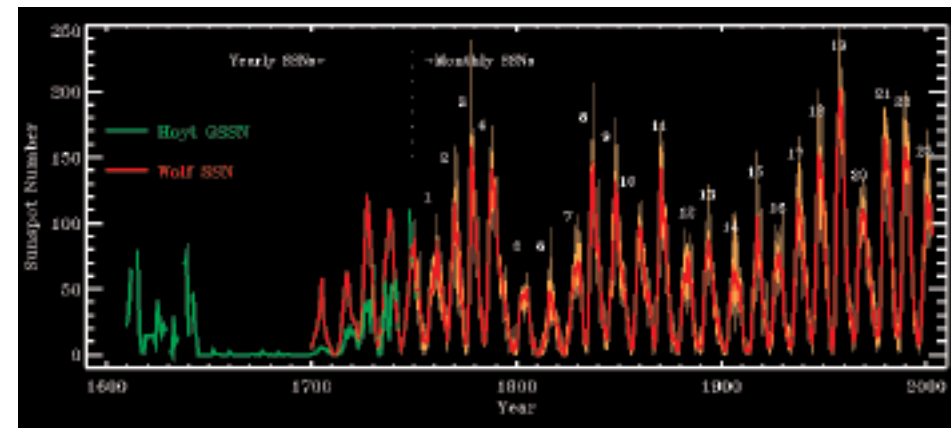


© ESA
Satellite Soho à proximité du Soleil.

LE SATELLITE SOHO

Soho (*Solar and Heliospheric Observatory*) est issu d'une collaboration européenne et américaine. Ce satellite a été lancé dans l'espace le 2 décembre 1995 depuis la Floride par la Nasa et s'est placé à 1,5 million de kilomètres de la Terre à un endroit très particulier, appelé point de Lagrange, où l'influence gravitationnelle du Soleil équilibre celle de la Terre. Depuis cet endroit privilégié, il a pu observer le Soleil sans interruption et dans des conditions de stabilité

remarquables. Soho est doté de douze instruments d'observation : trois sont dédiés à la sismologie, les autres à tous les phénomènes de l'atmosphère du Soleil (vent solaire, émissions de particules, éruptions...). Soho continuera d'observer le Soleil encore pendant plusieurs années, accompagné par d'autres sondes japonaise (Hinode), américaine (SDO) et un microsatellite du CNES, Picard, pour mieux comprendre l'activité solaire.



Evolution temporelle du nombre de tâches apparaissant sur la photosphère solaire, le cycle d'environ 11 ans est bien visible mais très variable.

La production de lumière et de chaleur n'est pas la seule manifestation du Soleil : s'y ajoutent vibration, rotation et magnétisme

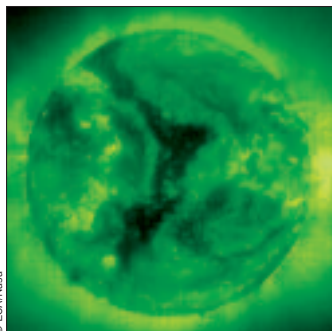
COMMENT ÇA MARCHE ?

En 1960 furent découverts des mouvements de la surface du Soleil, réguliers et de faible amplitude. Dix ans plus tard, des travaux théoriques montrèrent qu'en réalité ces mouvements ne sont pas que superficiels mais sont aussi le reflet de mouvements globaux qui affectent l'ensemble du Soleil. Celui-ci peut donc être assimilé à une cavité dans laquelle des ondes sonores évoluent à des fréquences très basses, inaudibles pour l'oreille humaine. En effet, les ondes sonores produites par le Soleil sont décalées de 17 octaves vers les

graves par rapport au diapason dont la fréquence a été fixée à 440 Hz : leur fréquence est donc de l'ordre de 3 mHz, ce qui correspond à une période d'environ 5 minutes.

Les ondes acoustiques produites en permanence par la granulation de surface, telle la pluie sur la surface d'un tambour, sont un moyen fantastique pour sonder le Soleil dans toute sa partie opaque. L'étude des vibrations du Soleil, qui se propagent depuis la surface et vont se réfléchir sur les différentes couches intérieures, permet de mesurer des grandeurs telles que le profil de la vitesse du son ou celui de la vitesse de rotation.

Le son se déplace à une vitesse d'environ 340 mètres par seconde dans l'air que nous respirons ; dans le Soleil, sa vitesse est de 500



© ESA/Nasa

La couronne solaire en période de forte activité.

“La compréhension de la variation de l’activité magnétique du Soleil permettra, dans les prochaines décennies, de mieux prévoir son impact sur l’environnement terrestre.”

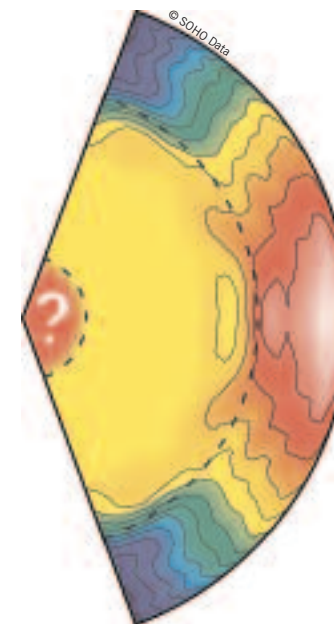
kilomètres par seconde au centre et d’environ 7 kilomètres par seconde à la surface.

Une onde acoustique pénétrant jusqu’au cœur du Soleil mettra environ une heure pour parcourir l’étoile. Cette onde est très sensible à la matière gazeuse qu’elle rencontre : étudier l’intérieur du Soleil par la sismologie permet donc de suivre *in situ* l’état et l’évolution du Soleil en permanence et en direct.

Tout tourne dans l’Univers et le Soleil tourne aussi sur lui-même, mais de façon différente entre l’équateur et les pôles. On a vu que la surface du Soleil, la photosphère, est parsemée de taches sombres que l’on peut suivre avec le temps : c’est ainsi que l’on mesure à quelle vitesse le Soleil tourne. Il est possible de mesurer que l’équateur tourne plus vite (environ 25 jours) que les pôles (plutôt 30 jours). Or il y a une relation entre la rotation de surface et les phénomènes magnétiques. On parle de

maximum d’activité lorsque le nombre de taches à la surface est le plus grand : c’est la période où l’activité magnétique du Soleil est la plus élevée, conduisant alors à de fortes éruptions solaires. Le satellite Soho est bien placé pour suivre ces phénomènes d’activité puisqu’il peut observer chaque région du Soleil en permanence. En période de forte activité, de grandes régions sombres et des éruptions de matière sont clairement visibles au niveau de la couronne (voir pages 16-17).

L’héliosismologie, grâce à Soho, a révélé que cette rotation différentielle de surface se maintenait dans l’ensemble de la région convective (région peu dense représentant 2 % de la masse solaire), puis disparaissait brutalement dans la région de transition située à la frontière entre région radiative et convective. En effet, cette région est le siège de forts cisaillements qui contribuent à la régénération du



Coupe de la rotation interne du Soleil obtenue par les instruments GOLF et MDI à bord de Soho: les parties rouges tournent plus vite que les parties bleues.

L’augmentation de la rotation du cœur, compatible avec les signaux des premiers modes de gravité, reste à confirmer.

champ magnétique. Ainsi une grande partie de la masse du Soleil (près de 50 %) tourne en fait comme un corps solide. Les premières observations de modes de gravité privilégie par contre une rotation plus rapide du cœur nucléaire que le reste de la région radiative. Si cela est confirmé, cela signifierait que le Soleil a gardé en son cœur, qui renferme près de 50 % de sa masse, un vestige de la rotation qu’il a acquis lors de sa formation, incluant probablement un champ magnétique fossile. Comprendre cette activité solaire est devenu aujourd’hui un problème important pour bien maîtriser son évolution à échelle humaine, ainsi que le rôle effectif du Soleil sur l’environnement terrestre. En effet, l’origine des phénomènes magnétiques externes se situe sous la photosphère et sa compréhension passe par la connaissance des mouvements internes de matière jusqu’au centre du Soleil. Les scien-

tifiques imaginent des circulations méridiennes dont la vitesse varie de dizaines de m/s (dans la région convective) jouant un rôle déterminant pour expliquer le cycle de 11 ans à des fractions de microns/s dans la région radiative (supposant alors un tour complet de cette région en milliard d’années).

HÉLIOSISMOLOGIE ET SIMULATION

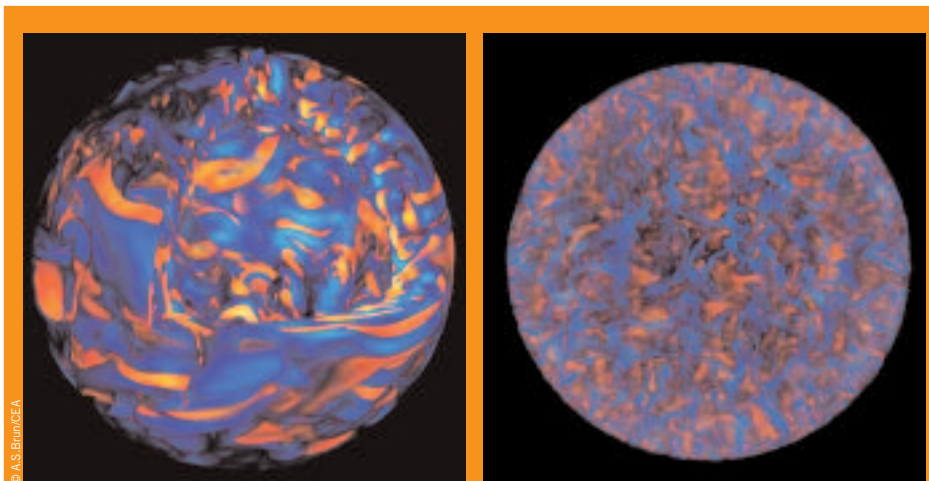
L’héliosismologie est la clé indispensable pour apporter des preuves quantitatives de ces mouvements à grande échelle. Elle s’associe aujourd’hui aux simulations numériques qui tentent de reproduire les observations pour les comprendre. Il est déjà établi que la rotation différentielle de la région convective contribue à la présence d’un champ magnétique dynamo cyclique qui implique l’ensemble de la région convective et la région de transition entre radiation et convection où

cette rotation différentielle disparaît appelée **tachocline**. De la compréhension de cette physique complexe, qui devra décrire comment le champ magnétique s'organise et se régénère, sortira l'explication de la durée et de l'intensité des cycles solaires qui ne sont pas réguliers avec des grands maxima et des grands minima comme le montre la figure de l'évolution des cycles depuis les premières mesures du 17^e siècle. Ces études permettront à terme d'estimer l'évolution de l'activité magnétique dans les prochaines décennies. Ceci a deux conséquences importantes : comprendre le Soleil permet de comprendre les autres étoiles, mais aussi comprendre le Soleil permettra de prévoir les phénomènes susceptibles de toucher la Terre, tels que les orages magnétiques pouvant causer de nombreuses perturbations, notamment dans les réseaux électriques et dans les communications radio hautes fréquences ou par satellites.

MESURER L'ACTIVITÉ DU CŒUR À LA COURONNE SOLAIRE

Une nouvelle discipline se met également en place pour mieux estimer l'impact de l'activité solaire sur l'atmosphère terrestre. C'est un des objectifs du satellite PICARD qui va venir en appui de Soho, du satellite japonais HINODE et du satellite américain SDO pour traquer et enregistrer l'ensemble des indicateurs d'activité solaire du cœur nucléaire à la couronne solaire. Ces mesures permettront de

changement rapide de vitesse de rotation



A gauche, champ magnétique dans une simulation globale non-linéaire de la dynamo convective du Soleil.
A droite, Vitesse radiale dans la zone convective turbulente solaire. Cette convection est à l'origine du transport de la chaleur vers la surface du Soleil.

LE PROJET COAST

Après l'instrumentation et l'observation, la simulation est la troisième voie de recherche en astrophysique. Les plus belles images de l'astronomie ne donnent pas une vision de l'Univers qu'en deux dimensions. Grâce à la puissance de nouveaux super-calculateurs, les scientifiques peuvent aujourd'hui simuler sur ordinateur la formation et l'évolution des astres avec des détails suffisants pour produire des images « virtuelles » en trois dimensions de très haute qualité.

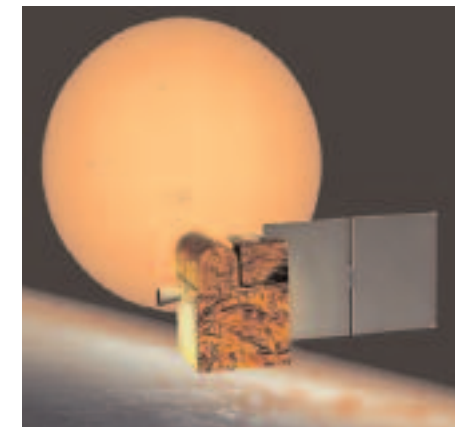
L'objectif du programme COAST est de modéliser des phénomènes astrophysiques complexes, afin de confirmer les théories actuelles sur la physique des astres et de préparer les futures observations

linéaire de la dynamo convective du Soleil. Cette convection est à l'origine du transport de la chaleur vers la surface du Soleil.

astronomiques. Les principales études qui ont bénéficié de ce programme sont la cosmologie, la physique stellaire, l'étude des disques protoplanétaires et celle du milieu interstellaire.

En physique stellaire, les étoiles sont de grosses sphères de gaz chaud. Elles sont turbulentes avec de nombreux phénomènes de convection, elles tournent sur elles-mêmes et baignent dans un champ magnétique auto-induit.

Le code ASH, soutenu par la commission Européenne via la bourse ERC-StG STARS2, calcule l'évolution des fluides stellaires.



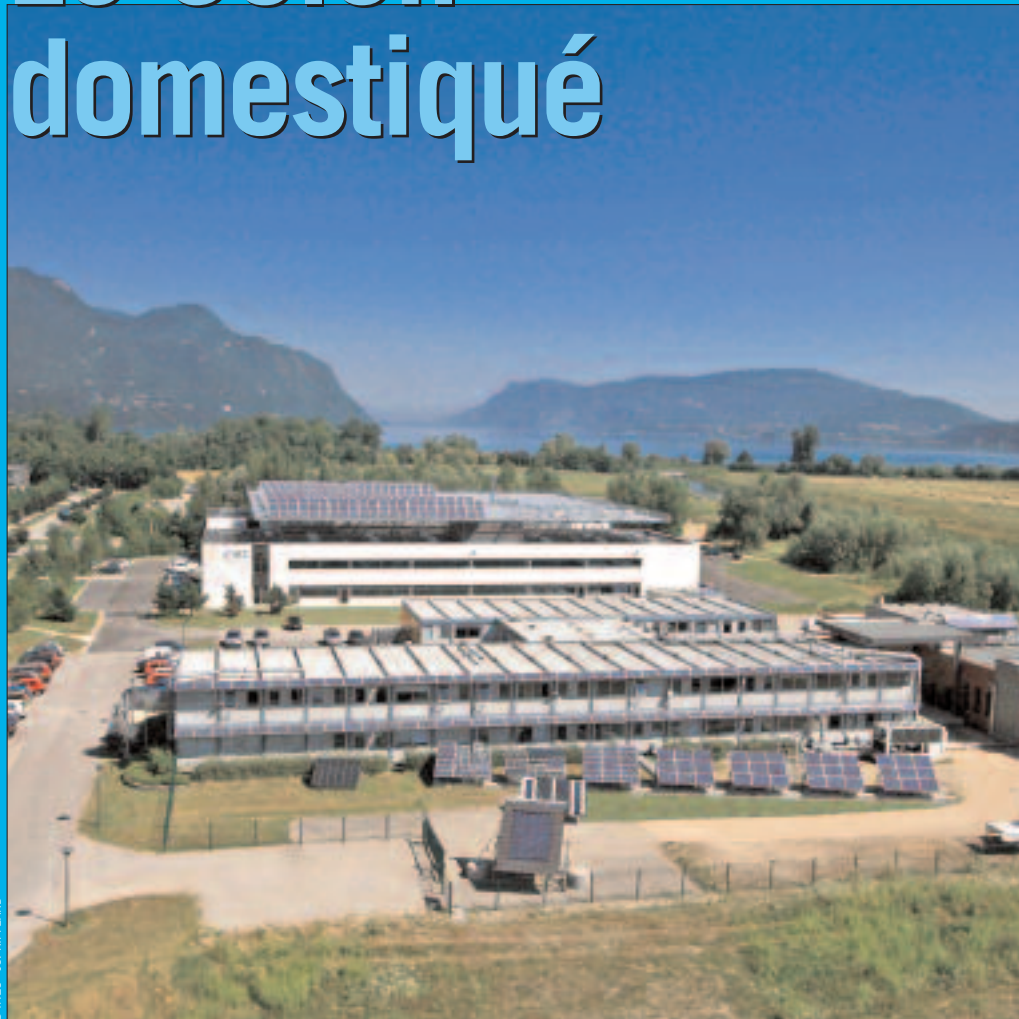
Le microsatellite du CNES PICARD va observer le Soleil à plusieurs longueurs d'onde et va observer ses déformations superficielles.

mieux estimer la réaction de la stratosphère et de l'atmosphère terrestre aux perturbations solaires qui s'amplifient du domaine visible aux domaines UV et X durs. Des travaux conjoints entre modélisation solaire et modélisation climatique en perspective à condition que des observations continues soient maintenues encore pendant une ou deux décennies.

Cette évolution rapide de notre connaissance du Soleil montre qu'un tel plasma inspire de très nombreux travaux théoriques, de modélisations et d'observations avec des implications sociétales nombreuses et passionnantes.

DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR SE CHAUFFER
OU PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ...

Le Soleil domestiqué



© INES - JC. RIFFLARD

Le Soleil constitue une énorme source d'énergie dans laquelle nous baignons en permanence. L'homme a compris depuis longtemps l'intérêt pour lui d'exploiter une telle source de lumière et de chaleur. Toutefois, il a été confronté jusqu'à aujourd'hui aux difficultés de récupérer cette énergie, de la transporter, de la stocker ou de la transformer en électricité : l'exploitation de cette source énergétique est récente et se développe mais reste encore très coûteuse. L'énergie solaire fait partie des **énergies renouvelables**. Actuelle-

Les énergies solaire, éolienne et hydraulique, la biomasse, la géothermie.

ment, il existe deux voies d'utilisation de l'énergie solaire qui transforment directement le rayonnement en

chaleur ou en électricité, respectivement le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Le CEA s'est particulièrement impliqué lors du premier choc pétrolier, au début des années 70, dans les applications thermiques. Il a mis en œuvre dans le Pacifique, dès 1978, les premières maisons, hôpitaux et hôtels solaires au monde. Depuis les années 1980, il continue ses activités dans le domaine thermique pour les bâtiments et a orienté ses recherches vers l'énergie solaire photovoltaïque dont il est devenu un acteur majeur.

L'ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

L'énergie solaire thermique est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe différentes sortes, mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Le matériau qui le recouvre doit être fortement absorbant, tel l'oxyde de chrome. Cette chaleur est ensuite transmise à un liquide ou un gaz qui la transporte (et que l'on appelle pour cela "caloporteur") vers un réservoir de stockage d'énergie. 4 m² de capteurs thermiques permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes et 10 m² assurent le chauffage d'une maison de 100 m² sous nos latitudes. Ce type de technique est, par exemple, utilisé pour les "planchers solaires directs". Dans ce cas, le caloporteur est directement envoyé dans le plancher des bâtiments à une température de



© CEA-Coulon

Panneaux solaires en silicium polycristallin au centre d'études de Cadarache.



© EyeMire

Une centrale solaire en Californie pour l'utilisation thermodynamique du rayonnement solaire.

25 °C environ, constituant un chauffage confortable des habitations.

L'énergie thermique du Soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Cela nécessite des températures importantes (de l'ordre de 1 000 °C) que l'on atteint en concentrant la lumière solaire avec des miroirs. En effet, qui n'a pas fait l'essai, un jour, de brûler un morceau de papier avec un miroir exposé au soleil? Ce principe, connu depuis l'Antiquité, est utilisé à plus grande échelle. Il existe aujourd'hui des centrales thermodynamiques dans lesquelles des centaines de miroirs (héliostats) servent à faire converger le rayonnement solaire sur une chaudière placée en haut d'une tour. Dans cette chaudière, des liquides caloporteurs vont emmagasiner la

chaleur (ils peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés), la transporter vers un réservoir d'eau et échanger leur chaleur avec l'eau. Ainsi chauffée, celle-ci se transforme en vapeur, entraînant une turbine pour produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques conventionnelles. La puissance de ce type d'installation est de l'ordre de quelques mégawatts; pour comparaison, une centrale nucléaire fournit une puissance de 1 000 mégawatts électriques. Un prototype de centrale à tour a été construit en France sur le site de Targassonne, dans les Pyrénées, au début des années 80 et fut exploité de 1983 à 1986. Des centrales avec des collecteurs cylindro-paraboliques existent à l'échelle industrielle; dans ce cas, le rayonnement solaire est concentré sur un axe où le

caloporteur est chauffé à plusieurs centaines de degrés. Cette technologie est utilisée dans la plus grande centrale thermique solaire au monde, située en Californie, dont la puissance électrique atteint 150 mégawatts.

L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'intérêt de cette technique est de convertir l'énergie du Soleil directement en électricité. Cette conversion, appelée "effet photovoltaïque" a été découverte dès 1839 par

Edmond Becquerel (1820-1891), mais ce

Père d'Henri Becquerel qui obtint le prix Nobel de physique en 1903, conjointement avec Pierre et Marie Curie, pour la découverte de la radioactivité naturelle.

n'est qu'en 1954 qu'apparut la première cellule photovoltaïque, ou

photopile, à haut rendement (6 %). Les rendements pour les **modules** actuels sont de l'ordre de 15-20 %.

Les cellules photovoltaïques

ensemble de cellules photovoltaïques en série, assemblé dans un cadre métallique avec leur structure mécanique.

sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté: la qualité "électronique" est de 10 milliardièmes de taux d'impuretés!

Actuellement, un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité, or le Soleil est partout. C'est pourquoi cette technique constitue une solution pour des applications peu consommatrices d'énergie: citons quelques exemples, dans les régions rurales, pour l'éclairage, pour alimenter les pompes à

eau, les réfrigérateurs, les téléviseurs, etc. On distingue deux marchés en croissance rapide: les applications autonomes, où l'énergie est produite, stockée et utilisée en un lieu unique, et l'application connectée au réseau, appelée souvent "toit photovoltaïque".

La première application, la plus répandue jusqu'en 1990, est apparue dans le domaine spatial pour les satellites puis les télécommunications, le balisage maritime et aérien, les bornes d'arrêt d'urgence, l'éclairage domestique, l'audiovisuel et le pompage de l'eau. Mais comme le Soleil n'est pas présent 24 heures sur 24, cette application nécessite l'utilisation de batteries qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement.

Au CEA, des recherches sont menées en particulier sur les batteries au plomb, dérivées

INES, INSTITUT NATIONAL DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'INES a été créé en 2006 à l'initiative des pouvoirs publics, pour promouvoir et développer en France l'utilisation de l'énergie solaire, et plus particulièrement au service de la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment.

Il est implanté au Bourget du lac sur le technopôle de Savoie Technolac, à proximité de Chambéry. La région Rhône Alpes est un territoire privilégié avec un réseau particulièrement dense d'acteurs de référence dans ces domaines: industriels, chercheurs, collectivités locales et associations.

Une équipe de plus de 150 chercheurs développe des solutions en partenariat industriel pour le solaire thermique et photovoltaïque.

“Une production d'énergie “propre”, illimitée, et présente sur toutes les régions du monde.”

des accumulateurs d'automobiles. Les travaux portent notamment sur la durée de vie des batteries, pour l'instant largement inférieure à celle des cellules photovoltaïques (respectivement de l'ordre de dix et trente ans). Les travaux récents laissent présager de nouvelles technologies pour le stockage, notamment les batteries lithium qui permettent des durées de vie équivalentes aux autres composants.

La seconde application, avec connexion au réseau, consiste à intégrer des modules photovoltaïques dans les toits et façades de bâtiments et maisons, produisant de l'électricité qui sera soit consommée sur place soit injectée dans le réseau.

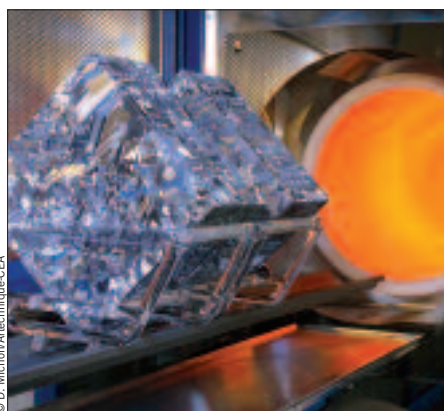
En résumé, le Soleil constitue une source d'énergie propre et (presque!) inépuisable, donc promise à un bel avenir mais encore très coûteuse.

Sans doute arriverons-nous à maîtriser cette énergie avant que la source ne se tarisse, dans environ 5 milliards d'années... En effet, le moment viendra où, à court d'hydrogène, le Soleil brûlera de l'hélium pour le transformer en carbone. Mais le processus n'ira pas plus loin : la température ne permettra pas de poursuivre cette alchimie stellaire jusqu'à la réduction du cœur en fer. Alors, la gravité le comprimera jusqu'à ce qu'il ait la taille de la Terre et le Soleil deviendra une naine blanche, étoile de faible luminosité, pour disparaître d'une mort douce, contrairement aux étoiles massives qui explosent en supernovae.



© Siemens Solar

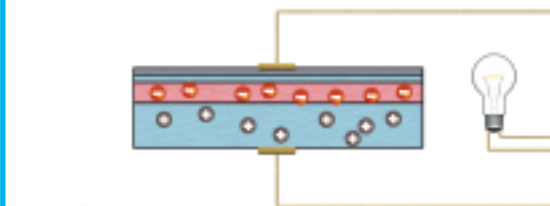
Un exemple d'application autonome : les télécommunications.



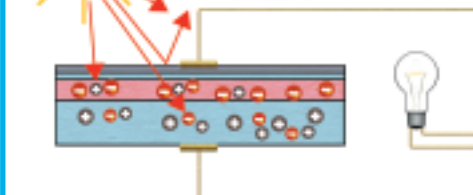
© D. Michon/Artechnique-CEA

Dans ce four, les plaques de silicium sont dopées à une température comprise entre 700 et 900 °C pour créer les jonctions qui constituent le cœur de la cellule photovoltaïque.

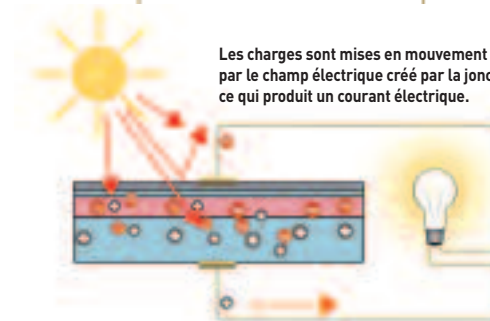
La cellule photovoltaïque contient des charges électriques du fait du dopage : négatives dans le type n (excès d'électrons), positives dans le type p (déficit d'électrons). Ces charges créent un champ électrique au niveau de la jonction.



Les photons de la lumière solaire arrachent des électrons aux atomes de silicium et créent des charges positives et négatives.



Les charges sont mises en mouvement par le champ électrique créé par la jonction, ce qui produit un courant électrique.



COMMENT ÇA MARCHE ?

Cette technique tire profit des propriétés optoélectroniques des semi-conducteurs qui permettent, sous certaines conditions, de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. La technologie la plus développée utilise le silicium comme matériau de base.

Une cellule photovoltaïque peut être, par exemple, constituée de deux couches de silicium dont on aura modifié les propriétés de transport électrique par dopage.

L'ajout d'atomes de bore favorisera la conduction par charges positives. Le silicium sera alors de type p.

Le dopage du silicium par des atomes de phosphore améliorera la conduction par charges négatives. Le silicium sera alors de type n.

La mise en contact d'un silicium dopé p et d'un silicium de type n se traduit par la création d'une jonction, dite p-n. Lorsqu'on expose la cellule à un éclairement solaire, des électrons et des trous sont générés au niveau de la jonction p-n, qui peut être considérée comme la zone active de la cellule. Ces électrons et ces trous se déplacent ensuite, respectivement à travers les zones n et p, pour atteindre les électrodes. Cette succession de processus, appelée effet photovoltaïque, conduit ainsi à la production d'un courant pouvant alimenter un appareil électrique.