



Introduction

L'exploration directe par des flottilles de vaisseaux spatiaux et l'observation depuis les grands télescopes ont, depuis quelques dizaines d'années, permis de découvrir toute la richesse et la diversité de notre système solaire au centre duquel notre étoile, le Soleil, envoie dans l'espace lumière et particules énergétiques. Les planètes telluriques sont relativement comparables à la Terre et pourtant aujourd'hui hostiles à la vie ; les planètes géantes et leur cortège de satellites présentent une extraordinaire variété ; les comètes et les astéroïdes gardent les traces mystérieuses de la formation et de l'évolution cataclysmique du jeune système solaire. Depuis la fin du xx^e siècle, le rythme des découvertes, auxquelles ont largement contribué les chercheurs français et européens, s'est accéléré : des milliers d'objets, dont certains plus gros que Pluton, ont été détectés au-delà de l'orbite de Neptune, et des centaines d'exoplanètes ont été décelées autour d'autres étoiles de notre galaxie, nous autorisant désormais à nous interroger sur l'existence de mondes habitables.

Cet ouvrage entraîne le lecteur éclairé, mais non spécialiste d'astronomie, dans un voyage dans l'espace à la découverte de nos origines, tout en le préparant aux défis des explorations futures. Il est rédigé par six spécialistes français internationalement reconnus dans leur discipline, déjà auteurs de livres d'astronomie à destination du grand public.

Le Soleil

par Sylvie Vaclair

Il y a bien longtemps, les êtres vivant sur la Terre se croyaient au centre du monde. Tout ce qu'ils observaient dans le Ciel, Soleil, Lune, étoiles, planètes, tournait autour d'eux au fil des jours et des saisons. Le Ciel était considéré comme parfait, alors que sur la Terre se déployaient simultanément le Bien et le Mal. Il était très difficile, dans ce contexte, d'admettre que la Terre était une planète comme les autres, en orbite autour d'une étoile, le Soleil. Il fallut accumuler beaucoup d'observations célestes et accepter de prendre du recul par rapport à la réalité quotidienne, pour finalement échapper aux mythes anciens et aboutir à l'unification de la Terre et du Ciel.

Le Soleil et les Terriens

Cette grande révolution s'est produite voici quatre siècles, à l'époque de Copernic et de Galilée. Qu'en est-il en ce début du XXI^e siècle ? L'image de la Terre, planète bleue et blanche « flottant » dans l'espace, est entrée dans l'imaginaire populaire. Sa fragilité, et plus spécialement celle de son atmosphère, est largement reconnue et l'humanité entière se motive pour la protéger. Dans ce contexte, le Soleil, source d'énergie, de chaleur et de lumière, est souvent considéré comme fixe, immuable, constant et éternel. Pourtant, les astronomes contemporains savent qu'il en va bien autrement. Le Soleil n'a pas toujours existé et il évolue vers une mort certaine. Dans sa prime jeunesse, son rayonnement était 30 % plus faible

qu'à présent, et il continue à augmenter, très lentement mais très sûrement. Cette augmentation n'a bien sûr rien à voir avec le réchauffement climatique actuel, car elle est beaucoup trop lente, mais elle a sans doute eu une importance non négligeable dans le cadre de l'évolution générale de la vie sur la Terre.

Loin de rester identique à lui-même, le Soleil se modifie sans cesse, recrée en permanence un champ magnétique qui finit par disparaître, éjecte des particules dans l'espace, jusque sur la Terre et bien au-delà. Heureusement ces modifications, pour importantes qu'elles soient, restent superficielles et ne changent pas le cours des événements qui se déroulent dans son cœur : là se produit, grâce à des réactions caractéristiques de fusion nucléaire, toute l'énergie qui permet au Soleil de rester stable et de nourrir, chauffer et éclairer les habitants de la planète Terre.

Le Soleil est une étoile, comme celles que l'on voit dans le ciel la nuit. La seule différence, très importante pour nous, est sa proximité. Il faut huit minutes à la lumière pour nous parvenir du Soleil, mais plus de quatre années pour parcourir la distance qui nous sépare de l'étoile nocturne la plus proche (Proxima du Centaure). Grâce à cette proximité, le Soleil est de loin l'étoile que nous connaissons le mieux et dont les caractéristiques sont déterminées avec la plus grande précision. On peut étudier ses régions externes en détail, point par point, ce qui apporte des informations très précieuses.

Grâce à l'existence de la Lune, et grâce à cette extraordinaire coïncidence qui fait que, vu de la Terre, notre satellite naturel a la même dimension que le Soleil et peut le cacher intégralement, les habitants de notre planète sont les témoins de l'un des plus merveilleux spectacles naturels qui soient, les éclipses totales de Soleil (planche couleur n° 1.1). C'est une chance inouïe ! La Lune est en effet 400 fois plus près de la Terre que le Soleil, et en même temps 400 fois plus petite, ce qui représente une coïncidence étonnante. Au cours des éclipses, la Lune fait disparaître petit à petit l'« Astre du Jour » en ne laissant qu'un croissant de plus en plus fin. À la dernière seconde, seul un point extrêmement brillant éblouit le spectateur, comme un diamant céleste. Et alors se produit l'incroyable : à la disparition du diamant apparaît tout à coup la couronne solaire, cette enveloppe ténue extrêmement chaude, qui peut prendre des formes très variées et changeantes au cours du temps, habituellement invisible à nos yeux éblouis par la lumière

solaire. Les observations de la couronne pendant les éclipses totales de Soleil apportent aux astronomes une moisson d'informations sur le fonctionnement de notre étoile et ses humeurs.

Le Soleil est en effet très complexe et dévoile d'étranges phénomènes aux observateurs médusés, comme les taches solaires, leur variabilité, le cycle magnétique solaire de 11 ans, le vent solaire. Nous y reviendrons au cours de ce chapitre. À présent, nous savons que beaucoup d'autres étoiles possèdent aussi des taches, des vents stellaires, des couronnes, mais il aurait été bien difficile de les mettre en évidence si nous n'avions pas auparavant connu et étudié en détail les phénomènes solaires.

L'étude du Soleil relève d'une tradition française bien ancrée, à la pointe au niveau international depuis plus d'un siècle. Fondé en 1876 par l'astronome Jules Janssen, l'observatoire de Meudon fut au début essentiellement dédié à l'observation du Soleil. Son service de suivi des taches solaires a longtemps été unique au monde. Des instruments comme la Tour solaire*, télescope vertical dédié à l'observation du Soleil, ou le spectrohéliographe*, qui utilise une astuce particulière pour « voir » directement ce qui se passe à une profondeur précise de l'atmosphère solaire, ont apporté des moissons de résultats. À présent l'archivage des observations solaires est repris par une banque de données* cogérée par l'observatoire de Meudon et l'observatoire Midi-Pyrénées, à Toulouse.

Dans les Pyrénées, l'observatoire du pic du Midi, déjà utilisé pour des études météorologiques au milieu du XIX^e siècle, fut terminé et confié à l'État en 1882. L'observation du Soleil y est restée l'une des plus actives. C'est là que l'astronome Bernard Lyot construisit en 1930 le premier coronographe*, instrument permettant d'observer la couronne solaire en créant des éclipses artificielles. À présent des coronographes sont envoyés dans l'espace, à bord de satellites. Ils permettent d'observer la couronne solaire très loin du Soleil lui-même, encore plus loin que pendant les éclipses. Les deux coronographes embarqués à bord du satellite SOHO, lancé dans l'espace en 1995, fournissent ainsi des images étonnantes de l'extension de la couronne solaire dans l'espace interplanétaire (planche couleur n° 1.2).

L'observatoire du pic du Midi est aussi connu pour ses observations très précises de la « granulation solaire » (figure 1.1), signature visible de la zone de convection qui se produit à l'intérieur du Soleil, sur environ 30 % du rayon. Ces observations sont effectuées avec

une lunette astronomique particulière, abritée dans la « coupole Tourelle » (figure 1.2). Plus récemment, en 1993, un instrument solaire européen, baptisé *Thémis*, a été construit aux îles Canaries pour effectuer le même type d'observations. L'avenir est aux grands instruments : la communauté française est à présent impliquée dans le projet de construction d'un très grand télescope solaire européen, l'EST (European Solar Telescope), dont la phase d'études préliminaires est programmée entre 2008 et 2010.

Figure 1.1. Granulation solaire. Les images en lumière blanche font apparaître la granulation, signature de la convection dans les régions externes du Soleil. Comme la matière qui monte est plus chaude que celle qui descend, elle est aussi plus brillante. C'est ainsi que les granules, dont la dimension moyenne est de l'ordre de celle de la France, sont entourées de bords sombres.

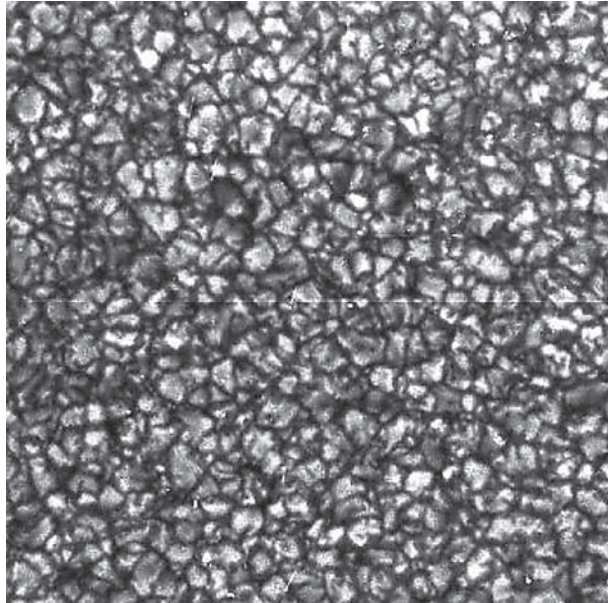
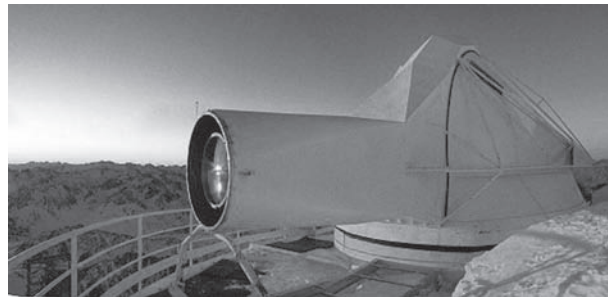


Figure 1.2. La coupole Tourelle de l'observatoire du pic du Midi, construite entre 1954 et 1961 à l'instigation de l'astronome Jean Rösch. La lunette solaire émerge directement vers l'extérieur au moment des observations, ce qui permet de diminuer les effets de turbulence de l'air ambiant.



Depuis une quarantaine d'années, nous savons que le Soleil vibre, comme la caisse de résonance d'un gigantesque instrument de musique. Des ondes sonores se propagent en permanence à l'intérieur de la grosse sphère. Elles provoquent en surface des variations lumineuses détectables par les instruments modernes d'observation. Cette « Chanson du Soleil » a révolutionné la

connaissance que nous avons de notre étoile, de son évolution, son passé, son futur. Une nouvelle science est née : l'héliosismologie. Nous la découvrirons dans la suite de ce chapitre.

Le Soleil : carte d'identité

La distance du Soleil à la Terre, environ 150 millions de kilomètres, est à présent mesurée avec une très grande précision. Elle varie au cours du temps, en raison de l'excentricité de l'orbite terrestre et des interactions gravitationnelles avec les autres planètes. L'amplitude des variations est d'environ 5 millions de kilomètres. On appelle « unité astronomique », en abrégé UA, la distance moyenne Soleil-Terre calculée très précisément. Sa valeur est de 149 597 870 km.

MESURE DIRECTE DES GRANDEURS SOLAIRES

Le rayon du Soleil est mesurable depuis la Terre dès que sa distance est connue. Encore faut-il le définir précisément : le Soleil n'ayant pas de surface solide, on définit le rayon à partir du centre comme la distance à laquelle l'énergie lumineuse chute brusquement (point d'inflexion). Sa valeur est de 695 997 km, soit plus de cent fois le rayon terrestre. Il est possible que ce rayon varie légèrement au cours du temps. Un satellite nommé Picard doit être lancé en 2009 dans le but principal de le mesurer d'une manière extrêmement précise. Initié par l'Agence spatiale européenne (ESA), ce satellite porte le nom de l'astronome français Jean Picard qui, à l'époque de Louis XIV, fut le premier à mesurer le rayon solaire.

On obtient la masse du Soleil grâce au mouvement de la Terre et des planètes, qui dépend de l'attraction gravitationnelle du corps massif autour duquel elles se déplacent. Elle est de 1,989 milliard de milliards de milliards de tonnes ($1,989 \cdot 10^{30}$ kg), soit environ 330 000 fois la masse de la Terre. La masse du Soleil correspond à 99,9 % de toute la masse du système solaire.

Le rayonnement solaire représente la source d'énergie la plus importante que reçoit la Terre. Une surface d'un mètre carré, située au-dessus de l'atmosphère, perpendiculairement aux rayons solaires, reçoit en moyenne 1 368 watts, environ vingt fois l'énergie d'une ampoule électrique courante. C'est ce que l'on appelle couramment

la « constante solaire », bien qu'elle ait en fait varié d'une manière très sensible depuis la naissance du Soleil. On en déduit la luminosité solaire, qui représente, par définition, l'énergie rayonnée par le Soleil chaque seconde, dans toutes les directions et dans toutes les longueurs d'onde : $3,826 \cdot 10^{26}$ W.

L'ARC-EN-CIEL, SPECTRE DU SOLEIL

Il arrive parfois, certains jours où le Soleil joue avec la pluie, que l'écharpe d'Isis se déploie dans un ciel sombre. La lumière du Soleil, diffusée par les gouttes d'eau dissimulées dans les nuages, revient vers nous avec un angle différent suivant les couleurs. Ainsi se constitue l'arc-en-ciel, ou « spectre solaire ». Le maximum d'énergie lumineuse se trouve dans le jaune, ce qui correspond à la couleur d'un objet en équilibre thermique* porté à une température de 5 800 K (où le symbole K représente le degré kelvin, mesuré à partir du zéro absolu : 0 °C correspond à + 273 K).

Lorsqu'on étudie en détail le spectre solaire, on s'aperçoit qu'il comprend un très grand nombre de raies sombres (planche couleur n° 1.3). Ces couleurs « avalées » sont la signature des atomes, ou éléments chimiques*, qui se trouvent dans les régions externes du Soleil. Ils absorbent la lumière à des longueurs d'onde très précises, qui correspondent à la manière dont les électrons sont organisés autour du noyau atomique. Il est possible, en étudiant l'intensité des raies, de calculer le pourcentage, ou « abondance », de chacun de ces éléments. Cette étude offre aussi une méthode indépendante pour déterminer la température superficielle du Soleil.

En réalité, la largeur et l'intensité des raies spectrales dépendent des conditions locales, comme par exemple les mouvements de matière. Les régions externes du Soleil subissent en permanence de la convection, avec des bulles qui montent et éclatent en surface, ce qui complique les calculs. Deux études différentes, qui ne tiennent pas compte de ces mouvements de la même manière, peuvent actuellement donner des résultats sur l'abondance de carbone ou d'oxygène solaire différents d'un facteur presque égal à deux !

S'il est vrai que le Soleil subit des réactions nucléaires en son cœur, le produit de ces réactions n'est pas transporté vers la surface. La composition chimique observée (figure 1.3) est donc très proche de celle du nuage de gaz initial qui l'a formé. Il en va de même pour les planètes géantes, contrairement aux planètes solides dont la composition a beaucoup évolué au cours du temps. La présence

de tous ces éléments dans notre Galaxie, avant la naissance du Soleil et du système solaire, était une condition nécessaire pour que la vie puisse se développer sur la Terre.

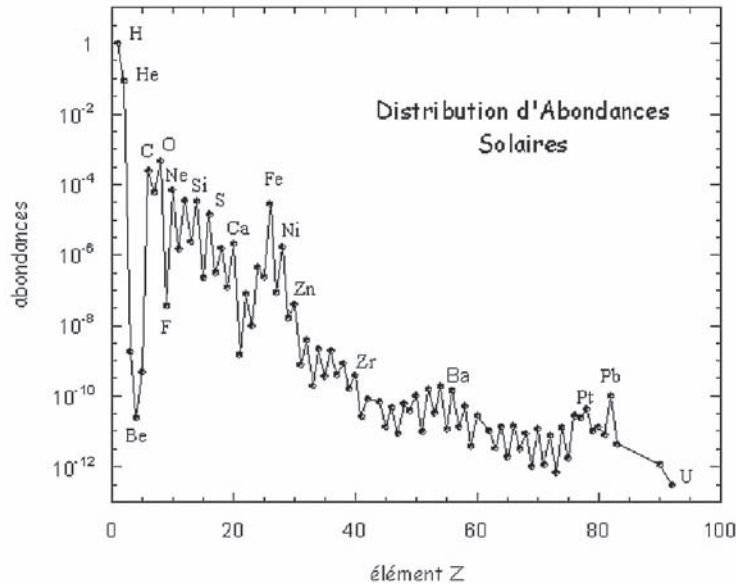
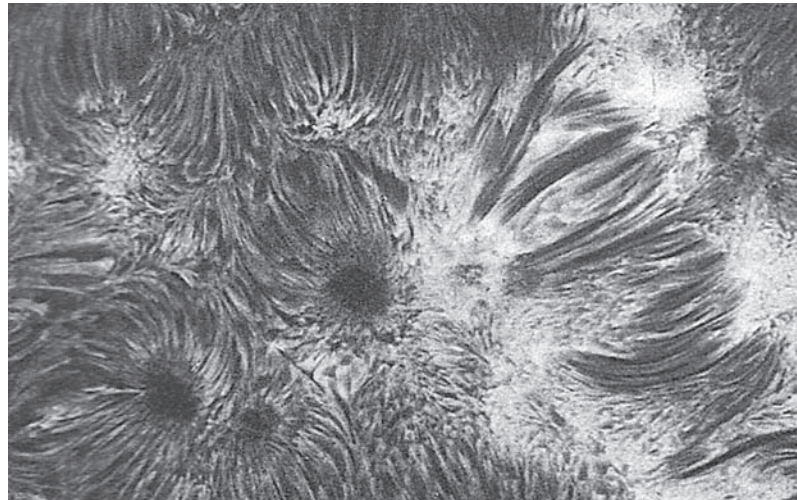


Figure 1.3. Courbe d'abondances solaires, ou « courbe d'abondances standard » des éléments. Toutes les abondances sont calculées par rapport à celle de l'hydrogène (en nombres d'atomes) qui est de loin l'élément le plus abondant, suivi par l'hélium (10 %), puis les éléments plus lourds ; les éléments légers lithium, béryllium et bore, très fragiles, sont beaucoup moins abondants. L'abscisse correspond à la charge des éléments chimiques. On remarque une décroissance générale rapide à mesure que la charge (et la masse) augmente. Cette composition chimique du Soleil correspond à celle de la nébuleuse protosolaire. Elle s'explique entièrement par la formation des éléments dans l'Univers primordial, les étoiles et la matière interstellaire avant la naissance du Soleil et de ses planètes. Les zigzags de la courbe d'abondance sont dus à des différences de comportement entre les noyaux atomiques possédant un nombre pair de protons et/ou neutrons et les autres.

Certaines raies spectrales sont utilisées pour obtenir des images du Soleil à des profondeurs différentes, comme des tomographies. On peut l'expliquer approximativement de la manière suivante : pour qu'une raie spectrale puisse se former, il faut qu'un certain nombre d'atomes absorbent la lumière solaire à cette longueur d'onde. S'il s'agit d'un élément très abondant, comme par exemple l'hydrogène, le nombre d'atomes nécessaires est atteint sur une faible profondeur. En revanche, pour un élément moins abondant, il faut une plus grande épaisseur. En conséquence, la raie intense de l'atome d'hydrogène appelée H_{α} (ou première raie de Balmer), provient de plus hautes régions de l'atmosphère solaire que les autres raies du spectre. On peut ainsi obtenir, avec des spectrohéliographes, des images des régions externes du Soleil à des profondeurs déterminées.

L'utilisation de la raie H_{α} permet d'observer une partie de la chromosphère, région de transition entre la sphère solaire et ce phénomène extraordinaire qu'est la couronne (figure 1.4). L'étude de la couronne solaire en rayons X ou en rayons ultraviolets très énergétiques (planche couleur n° 1.4) montre que sa température s'élève à deux millions de degrés. Un vrai casse-tête pour les astrophysiciens. Qu'on en juge : il fait environ 16 millions de degrés au centre du Soleil, puis la température diminue lente-

Figure 1.4. Image du Soleil obtenue dans la raie H_{α} grâce à un spectrohéliographe. L'image montre directement la région située environ 800 kilomètres au-dessus de la photosphère solaire. On remarque des filaments de matière étirés par la présence de champ magnétique. Plusieurs taches solaires sont aussi visibles.



L'ÂGE DU SOLEIL

L'âge du Soleil n'est pas directement inscrit dans les données observationnelles. D'une part il peut se déduire de l'âge de la Terre, obtenu en particulier par datations radioactives, d'autre part il se calcule à partir de la reconstitution théorique de son évolution. Fort heureusement, les âges trouvés de ces différentes manières concordent : 4,54 milliards d'années.

Il n'en a pas toujours été ainsi, et cette concordance représente l'un des grands succès de la physique associée à l'astrophysique. À la fin du XIX^e siècle, les physiciens ne savaient pas d'où pouvait provenir l'immense énergie solaire. Comme source possible de chaleur, ils ne connaissaient que les combustions chimiques (le feu) ou encore la transformation d'une énergie en une autre. Le Soleil pouvait, par exemple, soit se refroidir (mais les physiciens ont vite compris que ce n'était pas possible), soit se rétrécir et transformer l'énergie ainsi libérée en chaleur. Mais dans tous les

ment vers l'extérieur pour atteindre 5 800 degrés dans les régions superficielles (photosphère*), elle continue à décroître légèrement (environ 4 200 degrés à 500 kilomètres au-dessus de la photosphère) pour remonter dans la chromosphère (8 000 degrés dans ce que l'on appelle le « plateau chromosphérique », entre 1 000 et 2 000 kilomètres) et finalement faire un saut brutal à deux millions de degrés dans la couronne. Comme nous le verrons ci-dessous, la seule explication possible de ce « chauffage de la couronne » est liée aux importants phénomènes magnétiques se produisant dans les régions solaires superficielles.

cas la durée de vie du Soleil n'aurait été, selon les calculs, que de quelques dizaines de millions d'années, trop peu pour rendre compte de l'âge de la Terre.

Le mystère fut élucidé grâce à la découverte de l'énergie nucléaire, selon la célèbre relation d'Einstein, $E = mc^2$. La transformation au centre du Soleil de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium libère exactement l'énergie nécessaire à son équilibre. Les calculs montrent que l'âge du Soleil obtenu ainsi correspond précisément à l'âge de la Terre.

LA STRUCTURE INTERNE DU SOLEIL

Comme toutes les étoiles, le Soleil est une « sphère auto-gravitante », énorme boule de gaz chaud, en équilibre sous l'effet de son propre poids. Sa densité moyenne est de 1,41 (en d'autres termes, un litre de Soleil a en moyenne une masse de 1,41 kg), alors que la densité terrestre est de 5,52. Mais si la Terre est froide et solide, le Soleil est tellement chaud que tous les éléments sont sous forme gazeuse. De plus les collisions induites par les températures très élevées arrachent des électrons aux atomes : le gaz solaire est ce que l'on appelle un « plasma », constitué d'atomes ionisés et d'électrons libres.

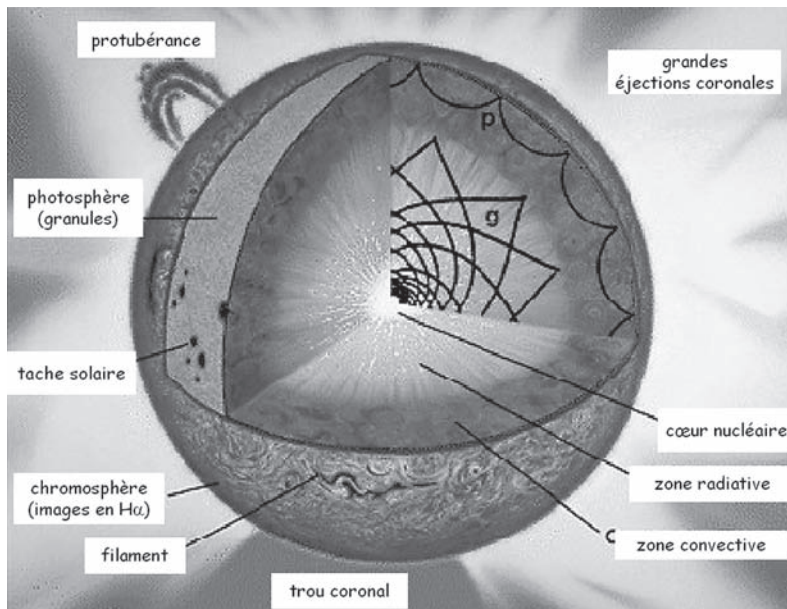


Figure 1.5. Schéma de l'intérieur du Soleil. L'énergie libérée par les réactions nucléaires au cœur du Soleil est transportée par le rayonnement jusqu'au bas de la zone convective (500 000 km de rayon environ) puis par convection jusqu'aux régions externes (la « photosphère ») où elle est rayonnée. Les lignes noires symbolisent les vibrations internes du Soleil. Près de la surface se propagent les ondes sonores, ou ondes de pression (p), qui pénètrent vers l'intérieur et remontent vers la surface où elles se réfléchissent ; plus ces ondes pénètrent profondément, moins elles possèdent de points de réflexion en surface. La figure montre aussi la trajectoire d'ondes de gravité (g) dans les régions centrales du Soleil ; contrairement aux ondes de pression, elles sont évanescentes dans la zone convective.

La structure interne du Soleil se déduit des calculs, en tenant compte de toutes les données obtenues par l'observation. L'énergie est produite au centre par les réactions nucléaires. Elle est ensuite

petit à petit transportée vers l'extérieur, sur les premiers 500 000 km, par le rayonnement : les photons issus des réactions nucléaires sont diffusés, absorbés par les atomes et réémis à l'intérieur de la grosse sphère. Ensuite, sur les 200 000 km restants pour atteindre les régions superficielles, l'énergie est transportée par convection (figure 1.5). Globalement, il faut environ vingt millions d'années pour que l'énergie produite au centre du Soleil atteigne l'extérieur : en d'autres termes, la chaleur que l'on ressent lorsqu'on prend un « bain de soleil » provient de réactions nucléaires qui se sont produites au centre de notre étoile vingt millions d'années plus tôt.

Chaque seconde, dans le cœur profond du Soleil, se produit la fusion de 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. Les 4 millions de tonnes restants sont transformés en quatre cent mille milliards de milliards de kilowatts ($4 \cdot 10^{26}$ watts), correspondant à la luminosité solaire. Ainsi, chaque année, le Soleil perd en rayonnement l'équivalent de $6 \cdot 10^{-14}$ fois sa propre masse. Depuis sa naissance, il y a quatre milliards et demi d'années, il a dépensé de cette manière environ trois millièmes de sa masse. Il perd aussi de la matière sous forme de vent solaire, à raison de $2 \cdot 10^{-14}$ masses solaires par an. La similarité de ces deux valeurs est fortuite.

L'hydrogène est le plus léger des noyaux atomiques : il est formé d'un unique proton. Comment quatre noyaux d'hydrogène, c'est-à-dire quatre protons, peuvent-ils se transformer en un noyau d'hélium, contenant deux protons et deux neutrons ? Il est nécessaire qu'une autre transformation se produise, avant ou pendant la réaction nucléaire proprement dite : celle qui change deux protons en deux neutrons. Cette transformation particulière, apparentée au phénomène de radioactivité, est appelée « interaction faible ». Alors que, d'une manière générale, les réactions nucléaires se produisent sur de courtes échelles de temps, l'interaction faible au contraire est extrêmement lente. C'est elle qui ralentit la transformation d'hydrogène en hélium à l'intérieur du Soleil, au point de la faire durer dix milliards d'années. Sans l'interaction faible, le Soleil aurait brûlé comme un feu de paille et nous n'aurions jamais pu exister.

Les scientifiques essaient à présent de reproduire sur Terre des réactions de fusion nucléaire, comme nouvelle source d'énergie. C'est le but du prototype international ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Mais contrairement à ce que l'on entend souvent, il n'est pas possible de reproduire exac-