

SOUS LES FEUX DU SOLEIL

VERS UNE MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

■ Jean LILENSTEN et Jean BORNAREL



SOUS LES FEUX DU SOLEIL

VERS UNE MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences poursuit un triple objectif :

- réaliser des ouvrages correspondant à un projet clairement défini, sans contrainte de mode ou de programme,
- garantir les qualités scientifique et pédagogique des ouvrages retenus,
- proposer des ouvrages à un prix accessible au public le plus large possible.

Chaque projet est sélectionné au niveau de Grenoble Sciences avec le concours de referees anonymes. Puis les auteurs travaillent pendant une année (en moyenne) avec les membres d'un comité de lecture interactif, dont les noms apparaissent au début de l'ouvrage. Celui-ci est ensuite publié chez l'éditeur le plus adapté.

(Contact : Tél. : (33)4 76 51 46 95, e-mail : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr)

Deux collections existent chez EDP Sciences :

- la *Collection Grenoble Sciences*, connue pour son originalité de projets et sa qualité
- *Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques*, collection présentant des thèmes de recherche d'actualité, traités par des scientifiques de premier plan issus de disciplines différentes.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

Comité de lecture pour " Sous les feux du Soleil "

- **Anne de RUDDER**, Chercheur au Rutherford-Appleton Laboratory, Oxford
- **Jean ABOUDARHAM**, Astronome à l'Observatoire de Paris-Meudon
- **Jean-Bernard ROBERT**, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
et
- **Gwenaëlle LECLAIR**
- **Nicolas PERETTO**
- **Didier RIEU**

Grenoble Sciences reçoit le soutien
du **Ministère de l'Éducation nationale**, du **Ministère de la Recherche**,
de la **Région Rhône-Alpes**, du **Conseil général de l'Isère**
et de la **Ville de Grenoble**.

Réalisation et mise en pages : **Centre technique Grenoble Sciences**
Illustration de couverture : **Alice Giraud**

ISBN 2-86883-540-6
© EDP Sciences, 2001

SOUS LES FEUX DU SOLEIL

VERS UNE MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Jean LILENSTEN et Jean BORNAREL



7, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Ouvrages Grenoble Sciences édités par EDP Sciences

Collection Grenoble Sciences

Chimie. Le minimum vital à savoir (*J. Le Coarer*) - Electrochimie des solides (*C. Déportes et al.*) - Thermodynamique chimique (*M. Oturan & M. Robert*) - Chimie organométallique (*D. Astruc*)

Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) - Mécanique statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) - La symétrie en mathématiques, physique et chimie (*J. Sivardière*) - La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J.P. Franc et al.*) - La turbulence (*M. Lesieur*) - Magnétisme : I Fondements, II Matériaux et applications (*sous la direction d'E. du Trémolet de Lacheisserie*) - Du Soleil à la Terre. Aéronomie et météorologie de l'espace (*J. Liliensten & P.L. Blelly*) - Probabilités et incertitudes dans l'analyse des données expérimentales (*K. Protassov*)

Exercices corrigés d'analyse, Tomes 1 et 2 (*D. Alibert*) - Introduction aux variétés différentielles (*J. Lafontaine*) - Analyse numérique et équations différentielles (*J.P. Demailly*) - Mathématiques pour les sciences de la vie, de la nature et de la santé (*F. & J.P. Bertrandias*) - Approximation hilbertienne. Splines, ondelettes, fractales (*M. Attéia & J. Gaches*) - Mathématiques pour l'étudiant scientifique, Tomes 1 et 2 (*Ph.J. Haug*)

Bactéries et environnement. Adaptations physiologiques (*J. Pelmont*) - Enzymes. Catalyseurs du monde vivant (*J. Pelmont*) - La plongée sous-marine à l'air. L'adaptation de l'organisme et ses limites (*Ph. Foster*) - L'ergomotricité. Le corps, le travail et la santé (*M. Gendrier*) - Endocrinologie et communications cellulaires (*S. Idelman & J. Verdetti*) - La biologie, des origines à nos jours (*P. Vignais*)

L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*)

Minimum Competence in Scientific English (*J. Upjohn, S. Blattes & V. Jans*) - Listening Comprehension for Scientific English (*J. Upjohn*) - Speaking Skills in Scientific English (*J. Upjohn, M.H. Fries & D. Amadis*)

Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques

Radiopharmaceutiques. Chimie des radiotraceurs et applications biologiques (*sous la direction de M. Comet & M. Vidal*) - Turbulence et déterminisme (*sous la direction de M. Lesieur*) - Méthodes et techniques de la chimie organique (*sous la direction de D. Astruc*)

INTRODUCTION

Sous les feux du Soleil présente les effets inattendus de l'activité solaire sur l'activité humaine. Si notre étoile a conservé des caractéristiques globalement identiques au long de l'histoire de l'homme, depuis peu, ses sautes d'humeur, ses éjections de matière et de rayonnement d'importance variable perturbent le fonctionnement de nos sociétés technologiques. Nous utilisons en effet de plus en plus, pour transmettre l'information et l'énergie, les mêmes vecteurs que la nature : des particules chargées et des ondes électromagnétiques. Ainsi, des pans entiers de notre environnement technique sont concernés : télécommunications, fabrication et transport de l'électricité, transport du pétrole, trains, systèmes de positionnement, avions et satellites... Les incidents et accidents se multiplient et il devient nécessaire de prévoir avec précision l'activité solaire, de quantifier la réponse de l'environnement terrestre : c'est l'objet de la météorologie de l'espace.

Le premier chapitre de l'ouvrage présente le Soleil et permet de connaître ses émissions d'ondes électromagnétiques et de particules, notamment vers la Terre. Le deuxième chapitre explique comment l'environnement ionisé et les caractéristiques magnétiques de la Terre constituent des protections naturelles aux rayonnements mortels et aux pluies de particules. Le troisième chapitre montre combien nos sociétés industrialisées, avec leurs réseaux électriques, leurs pipelines, avions... sont fragiles devant les phénomènes naturels.

Un lecteur très pressé, ou très cultivé, peut lire *Sous les feux du Soleil* d'un trait, comme un roman illustré par des figures et de splendides photographies. Des notes de bas de page complètent le texte et fournissent des précisions historiques, techniques ou scientifiques. Pour des compléments plus robustes, 24 annexes sont proposées. Certaines permettent à un lecteur de niveau scientifique équivalent au premier cycle universitaire de consolider sa compréhension d'un phénomène physique. D'autres annexes sont des enrichissements supplémentaires, placés ici pour ne pas alourdir le corpus du texte : on traite des relations entre le Soleil et les atmosphères des autres planètes, ou des instruments de détection nécessaires à la météorologie de l'espace, etc. Le glossaire permet de retrouver la signification d'un mot ou d'un sigle. La bibliographie de sites web et de livres, l'index et la table des matières sont là pour qui désire utiliser l'ouvrage comme outil de référence.

Nous espérons que *Sous les feux du Soleil* contribuera à faire mieux connaître le monde merveilleux qui nous entoure pour le comprendre et le respecter.

REMERCIEMENTS

Merci pour l'aide iconographique à Pierre, Nicole et Jean-François Mein (DASOP), Serge Koutchmy (IAP), Jean-Pierre Haigneré (CNES), Pierre Volke et Chantal Lathuillère (LPG), Messieurs Dubos, Leroy, Lambert, Besnier et Laurent (Uranoscope), Dirk Lummerzheim et Jan Curtis (Institut Géophysique d'Alaska), Renée Prangé et Laurent Pallier (IAS), Arslan Erinmez (National Grid) et aux responsables des expériences du satellite SOHO. SOHO est un projet de coopération internationale entre l'ESA et la NASA, agences qui ont opté pour une politique de diffusion la plus large des travaux scientifiques.

Merci pour les discussions scientifiques à Wlodek Kofman (LPG), Pierre Lantos, (DASOP), Jean-Louis Bougeret (responsable de la météorologie de l'espace au Programme National Soleil-Terre, DESPA), Ljiljana Cander (RAL, co-responsable d'un projet européen en relation avec la météorologie de l'espace), Jean-Yves Prado (CNES), François Lefeuvre (LPCE), et aux collègues qui, sous l'égide de ce dernier et de Bertrand Huet (ALCATEL), participent à l'étude de météorologie de l'espace de l'ESA. Merci également à Olivier Grünewald et Bernadette Gilbertas pour leur curiosité toujours en éveil.

Merci aux membres du comité de lecture de Grenoble Sciences, Chantal Lathuillère et Matthieu Kretzschmar (LPG), Paul Gilles (LPCE), Anne de Rudder (RAL, Grande-Bretagne), Jean Abouardham (DASOP), Jean-Bernard Robert (CRTBT) ainsi que Gwenaëlle Leclair, Nicolas Peretto et Didier Rieu. L'équipe de Grenoble Sciences : Nicole Sauval pour le travail de préparation éditoriale, Julie Ridard pour la mise en forme avec le soutien de Catherine Di Leo pour les illustrations, a permis l'édition de l'ouvrage dans des conditions idéales.

Les auteurs

A ma famille, à Geneviève, Lola et Maël

J. L.

Chapitre 1

LE SOLEIL

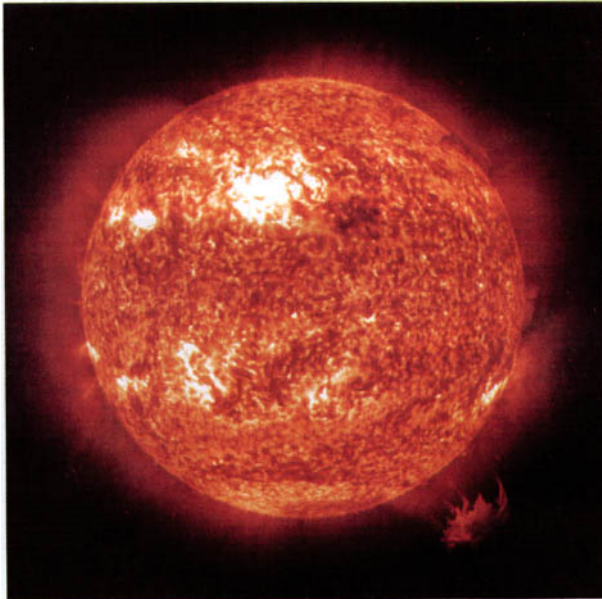


Figure 1.1 - Le Soleil, vu par EIT à bord du satellite SOHO

Le Soleil est à la source de l'énergie que nous recevons, à la source de la vie. Nous croyons le connaître, et pourtant nos yeux ne s'ouvrent que depuis si peu de temps ! Au dix-neuvième siècle, les premières études spectrales en déterminent la composition chimique. En 1945, dans l'annexe du projet Manhattan sur la réalisation de la première bombe atomique, des chercheurs expliquent l'origine interne de son énergie. Puis enfin, en 1995, c'est le lancement du satellite SOHO (ESA/NASA). Depuis cette date récente, les découvertes s'accroissent. Où en est-on aujourd'hui ?

1. LA FORMATION DES ÉTOILES ET DU SOLEIL

Il suffit de regarder le ciel par une nuit claire pour voir que, par endroits, la matière apparaît beaucoup plus condensée. Il s'agit principalement de nuages de gaz, de planètes de notre système solaire, d'étoiles ou de galaxies. Chacune de ces dernières

contient un grand nombre d'étoiles, environ 100 milliards dans la nôtre, qu'on appelle la Voie Lactée. Les galaxies, elles aussi, sont groupées. Dans notre "Groupe Local" on trouve une trentaine de petites galaxies autour de deux géantes : la nébuleuse d'Andromède et la Voie Lactée. Il faut à la lumière entre 80 000 et 110 000 années pour aller d'un bout à l'autre de la Voie Lactée, on dit que le diamètre de notre galaxie est situé entre 80 000 et 110 000 années lumière ¹. Ainsi, 3 à 4 millions d'années sont nécessaires pour traverser le Groupe Local.

Le Soleil n'est donc pas un objet exotique dans l'univers, c'est une étoile parmi d'autres. Mais comment de telles étoiles se forment-elles ? A partir de gaz, de l'hydrogène et de l'hélium formés abondamment au début de notre univers actuel, et d'un détonateur. Ce détonateur est une onde de choc qui se propage au devant du souffle d'une explosion. L'explosion est généralement celle d'une autre étoile. Cela pose d'emblée le problème de la première génération d'étoiles : l'onde de choc nécessaire peut avoir été celle associée à la première explosion, le fameux "big-bang" du début de notre univers, selon la théorie standard actuellement admise.



Figure 1.2 - Nuage d'hydrogène moléculaire dans la nébuleuse de l'aigle, photographié par le WFPC2 à bord du télescope spatial Hubble
 Il s'agit d'un incubateur d'étoiles. Certains globules sont visibles sur le bord des longs doigts de gaz (crédit J. Hester et P. Scowen – Arizona State University ; NASA).

¹ La distance correspondant à une année lumière est de $9,461 \times 10^{12}$ kilomètres.

Lorsque le mécanisme est initialisé, la gravité peut l'entretenir. En un endroit comprimé, la matière est plus abondante, si bien que les forces d'attraction gravitationnelles² y deviennent plus grandes. Ce secteur qui s'étale sur des dizaines, voire des centaines d'années lumières, attire vers lui les particules isolées environnantes, et l'ensemble devient bientôt opaque à la lumière des étoiles alentour. L'embryon d'étoile passe ainsi par une phase de refroidissement qui la mène à environ 10 kelvins, parce que l'extérieur ne peut pas le réchauffer. Mais dans son intérieur, comme la densité augmente, les chocs augmentent aussi³. Localement, des globules plus denses apparaissent, au sein desquels les collisions sont assez nombreuses pour que des réactions chimiques entre les atomes présents créent diverses molécules. La chaleur produite par ces chocs compense un moment le déficit de chaleur qu'impose l'opacité. C'est la phase dite isotherme. Lorsque la concentration est passée d'environ 10^5 à 10^{11} atomes par centimètre cube – un vide encore très conséquent par rapport aux 10^{19} molécules par centimètre cube de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer –, le rayonnement infrarouge émis par les collisions internes ne peut plus s'échapper : tout rayonnement émis depuis l'intérieur du nuage est réabsorbé à l'intérieur même du nuage ; l'énergie reste enfermée, et la température du nuage de gaz croît jusqu'à environ 100 kelvins. La densité, elle aussi, augmente sous l'effet de la gravitation. D'un côté, nous avons la gravité, qui comprime l'étoile. De l'autre, la chaleur dégagée par les collisions, qui ralentit la compression⁴. Lorsque la concentration de particules atteint 10^{14} atomes par centimètre cube, l'une et l'autre s'équilibrent ; l'effondrement dynamique du nuage s'arrête, dans une région de rayon équivalent à environ cinq fois la distance moyenne de la Terre au Soleil. Le volume ainsi défini s'appelle le premier noyau stellaire⁵.

-
- 2 La loi de gravitation exprime le fait que deux masses m et m' homogènes et de symétrie sphérique, placées à une distance d l'une de l'autre (position de leurs centres de gravité Γ et Γ'), s'attirent suivant la direction $\Gamma\Gamma'$ avec des forces de grandeur $F = G \frac{mm'}{d^2}$, où G est la constante universelle de la gravitation ($6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ en unités du Système International, c'est-à-dire avec des masses exprimées en kilogrammes, des distances en mètres et des forces en newtons).
 - 3 Voir en annexe 1 le lien thermodynamique qui associe le nombre de chocs à la pression et à la température.
 - 4 La chaleur créée par les chocs correspond à un rayonnement infrarouge, ou encore à des photons, de quantité de mouvement $\frac{h\nu}{c}$ (en module), qui créent sur une unité de surface une pression appelée "pression de radiation". Cette pression contribue à ralentir la compression du nuage.
 - 5 L'adjectif "stellaire" permet de le distinguer des noyaux atomiques dont il sera fait mention plus loin. Au sein de ce premier noyau, des forces magnétiques jouent également un rôle que nous n'évoquons pas ici.

Mais les parties externes, attirées par gravité, compriment ce premier noyau. La concentration et la température au centre augmentent progressivement jusqu'à 10^{16} atomes par centimètre cube et 2 000 kelvins. Ces valeurs sont suffisantes pour que les molécules diatomiques d'hydrogène se dissocient en atomes d'hydrogène. La réaction de dissociation de l'hydrogène consomme de l'énergie, ce qui diminue la température du premier noyau. La pression, qui supportait la masse du nuage, diminue, ce qui déclenche une seconde phase d'effondrement dynamique. Lorsque la concentration atteint 10^{24} atomes par centimètre cube (à peu près celle de l'eau liquide dans les conditions ordinaires) et la température 100 000 kelvins, la pression thermique est à nouveau suffisante pour équilibrer les forces gravitationnelles et un second noyau stellaire de quelques diamètres solaires se forme. Entre l'onde de choc et l'établissement du second noyau stellaire, il s'est écoulé environ 100 000 ans.

Ce second noyau stellaire résiste aux forces de gravitation interne jusqu'à ce que la température en son sein dépasse 10 millions de degrés. Les collisions sont alors si violentes que les noyaux d'hydrogène, malgré les forces électrostatiques qui les repoussent, entrent en contact les uns avec les autres. Des nucléons se combinent et forment du deutérium, puis des noyaux à quatre nucléons : l'hélium⁶. Un noyau d'hélium, issu par réaction nucléaire de quatre noyaux d'hydrogène, est plus léger que ces quatre noyaux d'hydrogène : la différence de masse s'est transformée en énergie. La masse de l'hydrogène est de 1,00797 gramme pour une mole⁷ tandis que celle de l'hélium est de 4,0026 grammes pour une mole. La différence de masse pour une seule mole produit une énergie de $2,6352 \times 10^{15}$ joules, c'est-à-dire de quoi alimenter 2 milliards de lampes de 100 watts pendant plus de 7 heures... Une étoile est créée.

La description précédente permet d'expliquer un grand nombre d'observations. Pour un modèle plus complet, il faudrait adjoindre l'effet de la rotation du nuage dans lequel se forme l'étoile. Dans l'univers, la rotation est une façon généralisée de consommer de l'énergie, et on la trouve à toutes les échelles, des plus grandes (rotation de galaxies) aux plus petites (atomes et molécules), en passant bien sûr par la rotation des planètes autour du Soleil, par leur rotation sur elles-mêmes, ou par celle du Soleil sur lui-même. L'établissement d'un modèle complet incluant la rotation dépasse le cadre de ce livre (quelques titres permettant son approche sont donnés en bibliographie). Notons toutefois que son apport a le grand mérite d'expliquer le fait que la plupart des étoiles se forment en système double, une étoile tournant autour de l'autre. A ce titre, le Soleil célibataire est plutôt une exception qu'un cas général.

6 Voir en annexe 2 les deux processus nucléaires impliqués dans cette transformation.

7 A la température de 273,15 kelvins et à la pression de 101 325 pascals, une mole représente 22,4 litres de gaz, soit $6,022 \times 10^{23}$ molécules. Ce dernier nombre est appelé le nombre d'Avogadro.

Les réactions nucléaires fournissent l'énergie qui fait briller l'étoile. Celle-ci s'installe alors dans un nouvel état stationnaire. Vue de l'extérieur, elle ne se modifie plus. Son rayon reste le même, sa couleur ne change pas, son débit d'énergie reste pratiquement constant. La première phase de sa vie, celle pendant laquelle elle s'est contractée et réchauffée, a duré environ 15 millions d'années. C'est la phase dite *T Tauri*. La seconde phase, dite *séquence principale*, celle pendant laquelle elle brille de façon régulière est celle de notre Soleil, et celle de 80% des étoiles observables dans le ciel. Elle a commencé il y a 4,6 milliards d'années pour le Soleil, et durera encore environ 5 milliards d'années.

Cette phase nucléaire se termine avec l'épuisement de l'hydrogène du cœur stellaire. Plus une étoile est massive, plus le moteur gravitationnel est puissant : elle brille davantage et épuise plus rapidement ses réserves en hydrogène. Une étoile de dix masses solaires consomme son carburant environ 5 000 fois plus vite que le Soleil. Par contre, les étoiles les moins massives ont une durée de vie plusieurs fois égale à celle du Soleil – si cependant elles atteignent la phase principale, ce qui n'est pas le cas pour celles dont la masse est inférieure à 0,08 masse solaire. Ces "trop" petites étoiles se contractent en naines brunes, puis noires voire, comme on pense l'avoir observé dans d'autres systèmes, en planètes géantes.

Dans 5 milliards d'années, lorsque l'hydrogène ne constituera plus que 5% de la matière du cœur, l'énergie interne du Soleil issue de la combustion nucléaire ne suffira plus à compenser la force de gravité qui tend à le faire s'effondrer sur lui-même. La contraction reprendra alors le dessus. Lorsque la température au centre dépassera 100 millions de degrés, une nouvelle réaction nucléaire sera possible : celle qui imbrique trois noyaux d'hélium pour former un noyau de carbone. Avant que cette réaction ne débute, l'échauffement produit par la contraction stimulera la combustion nucléaire de l'hydrogène à la périphérie de la région centrale. Cela induira une dilatation de l'étoile : le Soleil gonflera d'un facteur 100, devenant une *géante rouge*, comme Antares dans le Scorpion, ou Bételgeuse dans Orion. Après la fin de la combustion centrale de l'hélium, l'ancienne zone convective de l'étoile et une petite partie de la matière produite par le réacteur de fusion nucléaire – on dit aussi par *nucléosynthèse* – s'évacuera dans l'espace, en une couronne qu'on appelle *nébuleuse planétaire*, centrée sur une boule de cendre chaude, une *naine blanche*, d'un volume comparable à celui de la Terre. Cette naine blanche luira faiblement avant de s'éteindre en devenant une *naine noire*, d'un volume un million de fois plus petit que le volume actuel.

Les étoiles plus massives, de l'ordre de dix à douze masses solaires, peuvent continuer le cycle de fabrication d'éléments de plus en plus lourds, allant jusqu'au fer. Leur explosion, qui les transforme pour quelques jours terrestres en supernovae, permet de fabriquer des atomes plus lourds encore, et propulse l'ensemble des éléments élaborés dans l'espace. Ainsi, toute la matière dont sont faites les planètes telluriques est issue d'une ou plusieurs supernovae.

A l'intérieur du Soleil lui-même, bien que le gaz soit principalement composé d'hydrogène (93,96%) et d'hélium (5,9190%), on trouve également des traces d'autres éléments. Ceux-ci, comme dans le cas des planètes telluriques, ne peuvent trouver leur origine dans l'univers primordial composé essentiellement d'hydrogène et d'hélium. C'est donc qu'ils ont été eux aussi fabriqués par une étoile disparue.



Figure 1.3 - La nébuleuse NGC 6543, ou œil du chat, photographiée par le WFPC2 à bord du télescope spatial Hubble

Sa forme complexe suggère qu'elle est issue d'un système d'étoiles doubles dont l'une est devenue naine blanche il y a probablement un millier d'années. La résolution du télescope ne permet pas de distinguer les deux étoiles (crédit J.P. Harrington et K.J. Borkowski – University of Maryland ; NASA).

La proportion de ces éléments dans le Soleil peut paraître anecdotique, tant elle semble faible (tableau 1.1). Elle est pourtant primordiale pour une raison au moins : elle permet de caractériser l'étoile lors de son observation. En effet chaque élément physique possède ses signatures propres de par les longueurs d'ondes des ondes électromagnétiques qu'il émet à une température donnée. Si nous n'avions que l'hydrogène et l'hélium à observer, nous n'aurions qu'un nombre restreint de longueurs d'ondes n'apportant qu'une partie de l'information globale sur le Soleil. Le fait que nous puissions également observer le rayonnement d'éléments plus lourds, l'oxygène, le fer... nous livre une moisson de connaissances supplémentaires.

**Tableau 1.1 - Composition du Soleil
en pourcentage de masse des divers constituants ⁸**

Nom	Symbole	% en masse
Hydrogène	H	93,96
Hélium	He	5,9190
Oxygène	O	0,0648
Carbone	C	0,0395
Azote	N	0,0082
Silicium	Si	0,0042
Magnésium	Mg	0,0037
Néon	Ne	0,0035
Fer	Fe	0,0030
Soufre	S	0,0015
Aluminium	Al	0,0003
Calcium	Ca	0,0002
Sodium	Na	0,0002
Nickel	Ni	0,0002
Argon	Ar	0,0001

En raison des températures élevées en toute région du Soleil, les éléments que nous venons de citer sont dissociés en ions et électrons libres. Un tel mélange s'appelle un plasma. Quatrième état de la matière, le plasma peut être solide (c'est le cas des métaux) ou fluide. Il peut être mélangé à de la matière neutre (c'est le cas des atmosphères planétaires à haute altitude). Il peut être froid (jusqu'à quelques centaines de milliers de kelvins) ou chaud (au-dessus du million de kelvins). Il est sensible à la présence d'un champ électromagnétique, et possède la capacité de générer son propre champ électromagnétique.

2. LES CARACTÉRISTIQUES DU SOLEIL

Le Soleil est une étoile de taille moyenne comme il en existe des milliards dans l'univers. En voici les caractéristiques principales.

⁸ Ces proportions sont issues de l'analyse du spectre solaire, de celle de la composition du vent solaire et de modèles d'étoiles. Leur précision lors de ces calculs ne doit pas porter à confusion. De nombreuses incertitudes demeurent et, en outre, les modifications à l'intérieur du Soleil sont importantes. Par exemple, dans les couches périphériques, la fraction de masse de l'hydrogène se situe entre 69% et 75%, celle de l'hélium entre 25% et 29%, et celle des autres éléments est d'environ 2%.

Son diamètre équatorial est de 1 392 000 kilomètres, soit 109 fois celui de la Terre. Sa masse de 2×10^{30} kilogrammes représente à elle seule 99,97% de celle du système solaire. Sa masse volumique moyenne est de 1 400 kilogrammes par mètre cube (soit une densité de 1,4), environ un quart de celle de la Terre.

Le Soleil tourne sur lui-même. Son axe de rotation est approximativement perpendiculaire au plan dans lequel la Terre tourne autour du Soleil (le plan de l'écliptique), et permet de définir un pôle nord et un pôle sud géographiques. Par convention, ceux-ci sont du même côté du plan de l'écliptique que les pôles Nord et Sud de la Terre. Par convention également, l'ouest et l'est solaire font face à l'ouest et à l'est terrestre pour un observateur situé entre la Terre et le Soleil.

La rotation possède des caractéristiques surprenantes, lorsqu'on les compare à celles de la Terre. Il nous paraît tout à fait naturel qu'un jour ait la même durée au nord et au sud de la France, en Norvège et en Afrique, dans une fosse océanique ou au sommet d'une montagne. C'est parce que toute la Terre tourne d'un seul bloc, de façon rigide. Il n'en va pas de même sur le Soleil, où la matière à la surface près de l'équateur a une vitesse de rotation différente de celle proche des pôles. De plus SOHO a mis en

Tableau 1.2 - Quelques paramètres caractéristiques des planètes du système solaire et du Soleil

	Diamètre à l'équateur [km]	Masse [kg]	Masse / Masse du Soleil	Densité par rapport à l'eau liquide	Rotation propre (jour)	Gravité** [m s ⁻²]
Soleil	1 392 000	2×10^{30}	1	1,4	25,38	275,5
Mercure	4 880	$3,303 \times 10^{23}$	$1,65 \times 10^{-7}$	5,43	58,65	2,78
Vénus	12 100	$4,870 \times 10^{24}$	$2,44 \times 10^{-6}$	5,24	243,01*	8,60
Terre	12 756	$5,976 \times 10^{24}$	$2,99 \times 10^{-6}$	5,52	1	9,78
Mars	6 800	$6,421 \times 10^{23}$	$3,21 \times 10^{-7}$	3,95	1,026	3,72
Jupiter	142 800	$1,9 \times 10^{27}$	$0,95 \times 10^{-3}$	1,33	0,41	22,88
Saturne	120 800	$5,688 \times 10^{26}$	$2,84 \times 10^{-4}$	0,69	0,427	9,05
Uranus	47 600	$8,684 \times 10^{25}$	$4,34 \times 10^{-5}$	1,29	0,45*	7,77
Neptune	44 600	$1,024 \times 10^{26}$	$0,51 \times 10^{-4}$	1,64	0,67	11
Pluton	5 850	$1,29 \times 10^{22}$	$0,65 \times 10^{-8}$	2,03	6,39	0,4

* Vénus et Uranus tournent dans le sens rétrograde, c'est-à-dire dans le sens inverse de celui de la Terre.

** Il s'agit de la gravité moyenne à la surface.

évidence un gigantesque flux de plasma chaud, une “rivière” équatoriale qui coule 4% plus rapidement que la matière qui la borde. Elle est large d’environ 500 000 kilomètres (le diamètre de la Terre est d’environ 13 000 kilomètres) et profonde d’environ 200 000 kilomètres. Il existe deux autres rivières solaires en dessous des pôles qui, bien que beaucoup plus petites que la rivière équatoriale, sont encore immenses en comparaison des normes terrestres : chacune d’elles est large d’environ 27 000 kilomètres, de quoi contenir deux fois notre planète.

En même temps que le Soleil tourne, la matière qui se trouve à l’équateur dérive vers les pôles à une vitesse relativement lente : environ 80 kilomètres par heure. Le flux de retour de la matière depuis les pôles vers l’équateur devrait se trouver à une profondeur de 200 000 kilomètres (cette hypothèse reste à confirmer). Il transporterait la matière environ dix fois plus lentement qu’en surface. Ainsi, le cycle complet qui amène une particule depuis la surface de l’équateur solaire jusqu’à un pôle, puis retour par l’intérieur du Soleil aurait une durée supérieure à vingt ans, valeur qui est à rapprocher de la durée du cycle d’activité solaire.

Comme la vitesse de rotation du Soleil varie de l’équateur au pôle, il est nécessaire de préciser la latitude⁹ chaque fois que l’on donne une valeur. La référence habituellement choisie est 16°. Ainsi à cette latitude, vu de la Terre, le Soleil semble tourner sur lui-même en 27,2753 jours terrestres. Si nous faisons une moyenne latitudinale de l’équateur au pôle, nous trouverions la valeur de 27,7 jours avec des valeurs extrêmes d’environ 35 jours près des pôles et 25 à l’équateur. C’est ce qu’on appelle la *rotation synodique*. Cependant, la Terre tourne sur elle-même, et tourne de surcroît autour du Soleil. La rotation solaire que nous mesurons depuis notre sol est en fait la composante des rotations terrestres et de la rotation propre du Soleil. Un observateur fixe dans le système solaire verrait la seule rotation propre du Soleil, la *rotation sidérale*, qui est de 25,38 jours en moyenne au cours du temps, à la même latitude de 16°.

On vient de décrire la vitesse de rotation à la surface du Soleil. Mais de même qu’elle varie en latitude, on sait qu’elle se modifie avec la profondeur. Selon des mesures indirectes, si l’on descend à l’intérieur du Soleil, la vitesse de rotation synodique (celle qui servira de référence par la suite et qui vaut 27,7 jours en moyenne) croît d’abord jusqu’à 50 000 kilomètres de la surface, où la rotation s’effectue en 26,6 jours. Ensuite, la vitesse de rotation décroît régulièrement avec la profondeur jusqu’à 0,5 rayon solaire (rotation en 29 jours environ). Le cœur du Soleil, par contre, tournerait sur lui-même en environ 8 jours.

9 La latitude d’un lieu sur une sphère en rotation est l’angle entre la normale du lieu et le plan équatorial. Nous reviendrons sur cette notion dans le chapitre 2 et ses annexes.

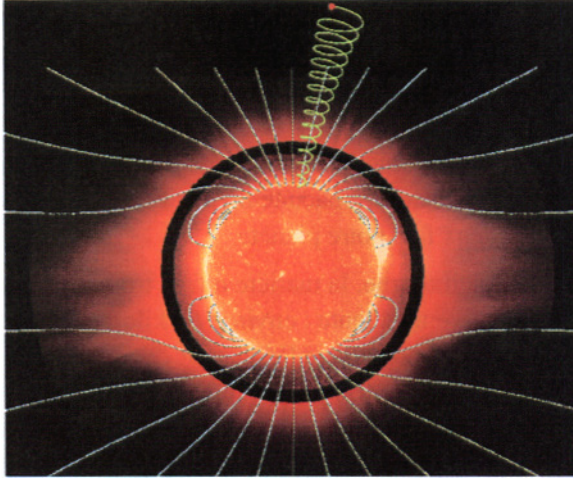


Figure 1.4 - Les lignes de champ magnétique solaire, issues d'un modèle théorique pour une activité minimale solaire

On y distingue une composante dipolaire (c'est-à-dire un pôle nord et un pôle sud), mais également des composantes quadripolaires. Les trous coronaux (voir dans ce chapitre) sont surmontés de lignes ouvertes sur lesquelles spiralent des particules solaires. Cette combinaison d'images montre le rayonnement solaire ultraviolet émis par la couronne solaire (voir dans ce chapitre), le 17 août 1996. La photographie du disque solaire (voir également dans ce chapitre) est prise par l'instrument EIT, et la couronne par l'instrument UVCS (dans une longueur d'onde de l'oxygène cinq fois ionisé) tous deux à bord de SOHO.

Le Soleil calme – on donnera bientôt la signification de ce terme – possède un champ magnétique ¹⁰ d'une valeur moyenne à la surface d'environ 10^{-4} tesla ¹¹. Dans la direction de la Terre d'où nous l'observons, la composante de ce champ s'appelle la composante *longitudinale*. Elle est également de l'ordre du gauss. Notre Terre aussi possède un champ magnétique, de l'ordre de 0,5 gauss à sa surface, c'est-à-dire comparable à celui du Soleil. Sur notre planète, nous sommes accoutumés à nos deux pôles magnétiques, le pôle nord et le pôle sud. Lorsqu'un champ magnétique possède ainsi deux pôles, on dit simplement qu'il est dipolaire. En est-il de même sur le Soleil ? Oui, mais d'une façon curieuse : la composante dipolaire solaire a une intensité variable au cours du temps, et cette variation semble relativement périodique, avec une période de onze ans.

10 Un champ magnétique est associé à des charges en mouvement. Lorsqu'une charge effectue un mouvement de rotation, son moment magnétique est perpendiculaire au plan de rotation. Le plus souvent, les moments magnétiques sont distribués au hasard dans la matière, si bien que la résultante (somme des moments) s'annule. Lorsque les mouvements s'ordonnent, les moments magnétiques peuvent s'ajouter les uns aux autres de telle sorte que la résultante soit non nulle. Des rappels d'électromagnétisme, et notamment l'expression du dipôle, sont donnés en annexes 3 et 4.

11 10^{-4} tesla = 1 gauss.

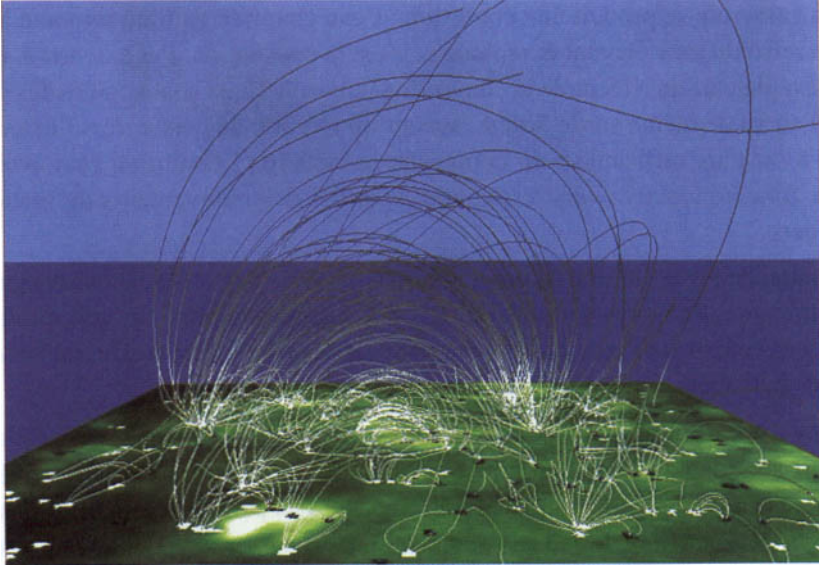


Figure 1.5 - Les lignes de champ magnétique solaire à petite échelle issues d'un modèle théorique et d'observations

Sur cette représentation, les lignes les plus hautes s'élèvent à environ 0,25 rayons solaires. L'échelle horizontale est de l'ordre de 100 000 kilomètres (crédit SOHO/MDI).

Outre cette composante dipolaire, il existe deux couples de pôles nord et sud supplémentaires, comme indiqué sur la figure 1.4, forme appelée naturellement quadri-polaire, elle aussi variable dans le temps. Mais le champ magnétique solaire possède à toutes les échelles des composantes qui rendent sa description extrêmement complexe. Ainsi, la figure 1.5 représente une modélisation qui reproduit des observations du champ magnétique à la surface solaire.

Il apparaît depuis quelques années que le comportement du Soleil peut être interprété et prédit grâce à une connaissance précise de son champ magnétique, jusqu'aux échelles les plus intimes. Nous sommes encore loin d'avoir acquis ce savoir.

3. LA REPRÉSENTATION DU SOLEIL

Pour comprendre ce qui se passe dans le Soleil, on peut faire une analogie avec de l'eau en train de bouillir dans une casserole. Le feu du réchaud représente le cœur du Soleil. Mais, dans le Soleil, c'est une fusion nucléaire qui produit l'énergie, alors que dans notre comparaison, il s'agit d'une réaction chimique entre le gaz de la cuisinière et l'air.

La casserole ne se déforme pas lorsqu'on la chauffe. Elle ne fait que transmettre l'énergie, elle la *rayonne* : c'est une zone radiative. Il en va de même sur le Soleil : autour du cœur, la matière n'est pas assez compactée pour générer une fusion nucléaire, mais trop pour bouger. Elle ne peut que rayonner l'énergie qu'elle reçoit.

Dans la casserole se produit une ébullition : l'eau chauffée au fond remonte à la surface, se refroidit en s'élevant et replonge : c'est la convection. Par extension, certains types de radiateurs qui créent de la convection atmosphérique sont appelés des convecteurs. Il en va de même sur le Soleil : lorsqu'on s'écarte du centre vers l'extérieur, la gravité n'est plus suffisante pour compacter la matière : l'ébullition peut avoir lieu : c'est la zone convective solaire qui correspond à des mouvements de matière par convection.

Par ailleurs, de l'évaporation se produit au-dessus de la casserole : il existe également un phénomène d'évaporation solaire. Si on y regarde de près, on voit qu'entre les bulles convectives de l'eau, des petites gouttelettes sont éjectées. De même, dans le Soleil, de la matière est éjectée à la surface.

L'analogie ne doit pas être poussée trop loin : en premier lieu, les productions d'énergie sont de natures différentes (fusion nucléaire contre combustion d'un gaz). Ensuite, les atomes constituant la casserole restent liés par des forces électrostatiques et non gravitationnelles. L'eau est contenue dans la casserole alors que la zone radiative solaire est à l'intérieur de la zone convective. L'évaporation solaire n'est pas la même que celle provenant d'un liquide, et des forces magnétiques contribuent à l'éjection des gouttelettes de matière solaire.

Ce type de représentation du Soleil était acquise dès les années 1950 et n'avait guère évolué au cours des 40 années suivantes. Depuis, notre vision a quelque peu progressé.

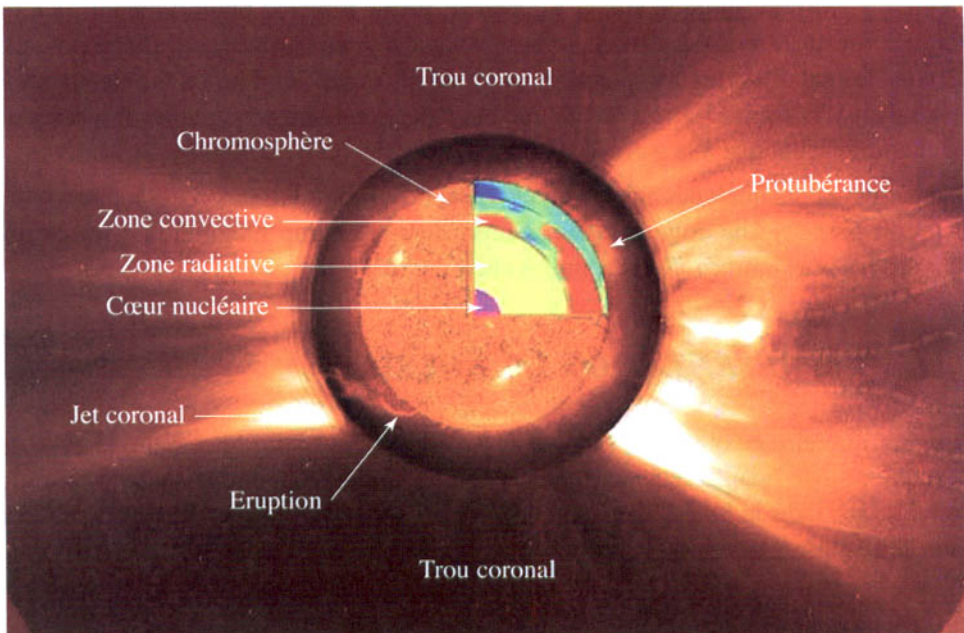


Figure 1.6 - Structure du Soleil à partir de différents instruments à bord du satellite SOHO (sources SOHO/MDI pour la coupe interne, EIT pour la chromosphère, LASCO pour la couronne solaire)

TABLE DES MATIÈRES

Introduction – remerciements.....	5
Chapitre 1 – Le Soleil.....	7
1. La formation des étoiles et du Soleil.....	7
2. Les caractéristiques du Soleil.....	13
3. La représentation du Soleil.....	17
4. La structure interne du Soleil.....	19
5. La photosphère, le rayonnement solaire, le vent solaire.....	24
6. L’atmosphère solaire : profil thermique.....	31
7. La dynamique solaire.....	34
7.1. Taches solaires. Cycle solaire. Protubérances et éruptions.....	34
7.2. Trous coronaux. Vent rapide.....	45
7.3. Structure à grande échelle : jets coronaux.....	47
7.4. Les éjections de masse coronale.....	49
7.5. Un indice de l’activité solaire.....	52
8. Le Soleil : à la source de la météorologie de l’espace.....	54
Chapitre 2 – La Terre.....	57
1. La Terre dans le système solaire.....	57
2. Structure interne de la Terre : le champ géomagnétique.....	61
3. L’atmosphère terrestre.....	66
3.1. L’homosphère.....	66
3.2. L’hétérosphère, la thermosphère, l’ionosphère.....	69
4. La magnétosphère.....	76
4.1. La magnétosphère et les systèmes de courants.....	78
4.2. Les aurores polaires.....	88
4.3. Les orages et sous-orages magnétiques.....	94
4.4. Les éclairs des hautes altitudes.....	97
Chapitre 3 – Vers une météorologie de l’espace.....	99
1. Conséquences des agressions solaires sur l’environnement technologique.....	101
1.1. Les pipelines.....	101
1.2. Le transport de l’électricité.....	102
1.3. Le chemin de fer.....	106
1.4. Les télécommunications.....	106

1.5. Le décollage d'un engin spatial.....	110
1.6. Le vol des satellites.....	111
1.7. L'entrée d'un engin spatial dans l'atmosphère	118
1.8. Les débris spatiaux et leurs effets.....	119
2. Autres impacts de l'activité solaire	122
2.1. Les effets biologiques.....	123
2.2. Le climat.....	125
2.3. Les compagnies d'assurances	128
2.4. La défense militaire	129
2.5. Le tourisme et l'éducation du public.....	129
3. La météorologie de l'espace pour prévoir.....	130
3.1. L'acte de naissance.....	130
3.2. Une science à construire et ses applications.....	134
Annexes.....	137
1 – Densité et énergie cinétique d'un gaz.....	137
2 – Les processus nucléaires internes du Soleil.....	140
3 – Le champ électromagnétique.....	143
4 – Champ magnétique dipolaire.....	147
5 – Effet Doppler et longueur d'onde.....	152
6 – Grandeurs photométriques.....	154
7 – Le corps noir	158
8 – Vue d'ensemble sur les ondes électromagnétiques	161
9 – Champ magnétique et mouvement des particules, plasma et champ gelés.....	164
10 – Pression cinétique et pression magnétique	168
11 – La force de Coriolis.....	169
12 – Les lois de Kepler.....	173
13 – Temps sidéral et temps solaire	176
14 – Caractérisation de l'activité magnétique au moyen d'indices.....	179
15 – Variation de la concentration moléculaire avec l'altitude	181
16 – Eléments de chimie atmosphérique.....	183
17 – Mouvement d'une particule chargée dans un tube de champ magnétique	186
18 – Calcul de la position de la magnétopause	189
19 – Les planètes du système solaire sous les feux du Soleil.....	191
20 – La Lune sous les feux du Soleil.....	200
21 – Comètes, météores et astéroïdes sous les feux du Soleil.....	203
22 – Paramètres orbitaux.....	207
23 – Les instruments de la météorologie de l'espace.....	211
24 – Organiser la météorologie de l'espace.....	218