

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 Grünwald 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

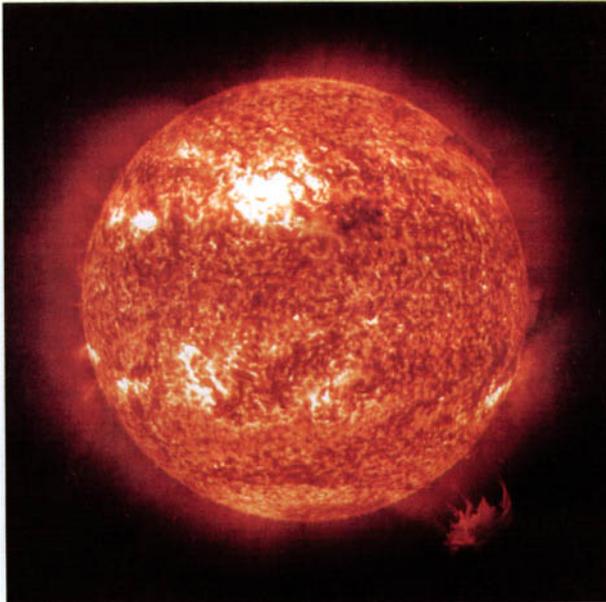


Figure 1.1 - Le Soleil, vu par EIT à bord du satellite SOHO

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.

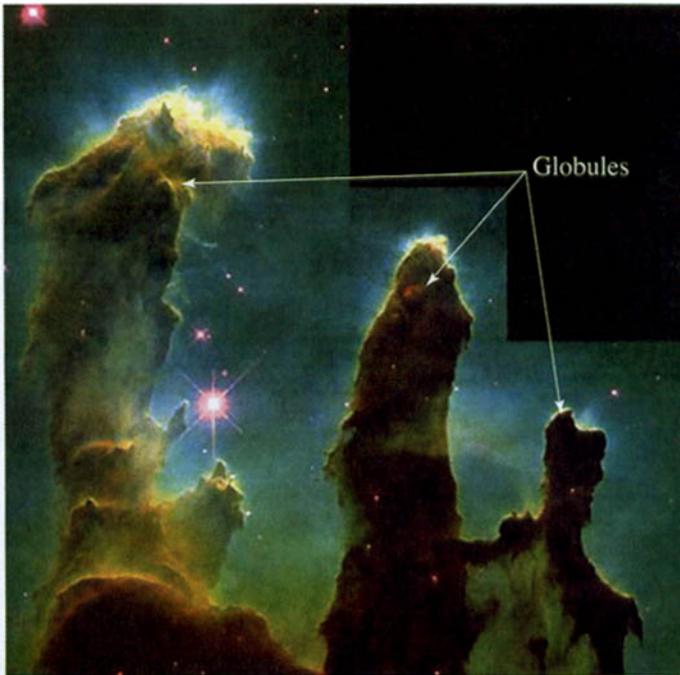


Figure 1.2 - Nuage d'hydrogène moléculaire dans la nébuleuse de l'aigle, photographié par le WFPC2 à bord du télescope spatial Hubble
 Il s'agit d'un incubateur d'étoiles. Certains globules sont visibles sur le bord des longs doigts de gaz (crédit J. Hester et P. Scowen – Arizona State University ; NASA).

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.

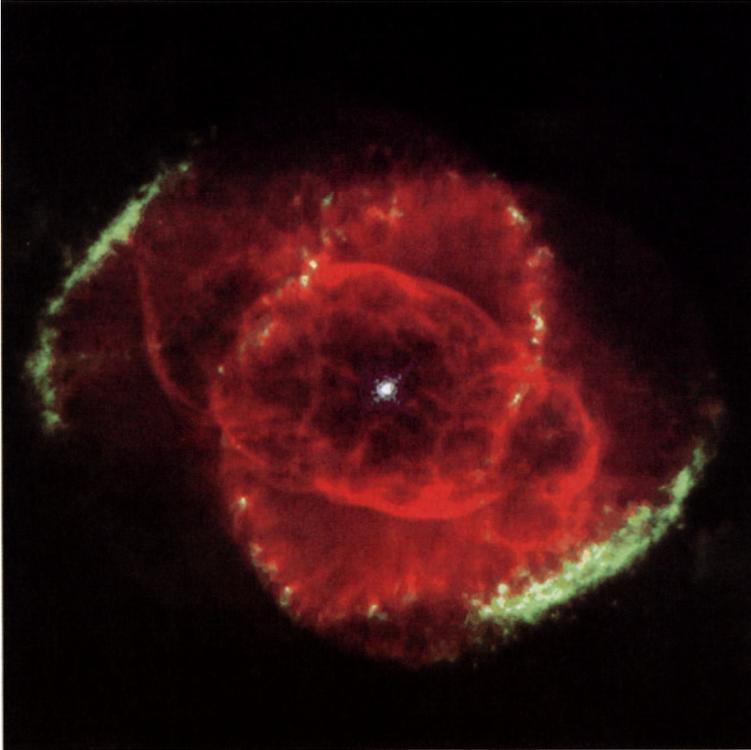


Figure 1.3 - La nébuleuse NGC 6543, ou œil du chat, photographiée par le WFPC2 à bord du télescope spatial Hubble

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 constituants⁸**

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.

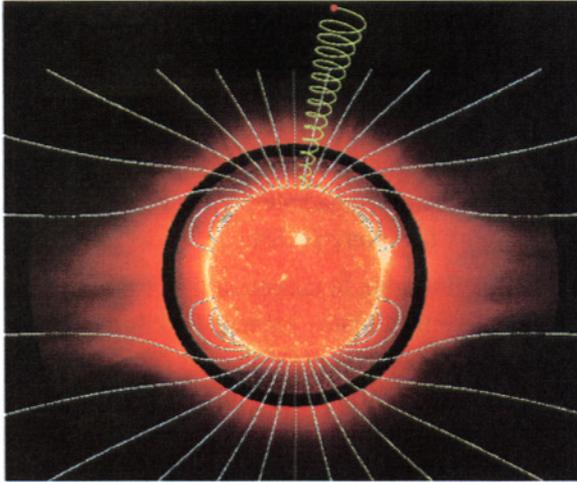


Figure 1.4 - Les lignes de champ magnétique solaire, issues d'un modèle théorique pour une activité minimale solaire

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.

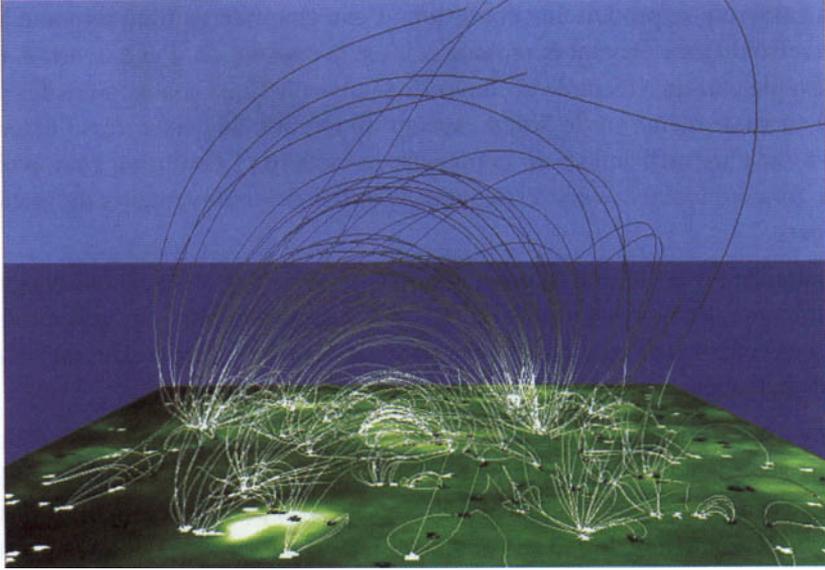


Figure 1.5 - Les lignes de champ magnétique solaire à petite échelle issues d'un modèle théorique et d'observations

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 quadripolaire, 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.

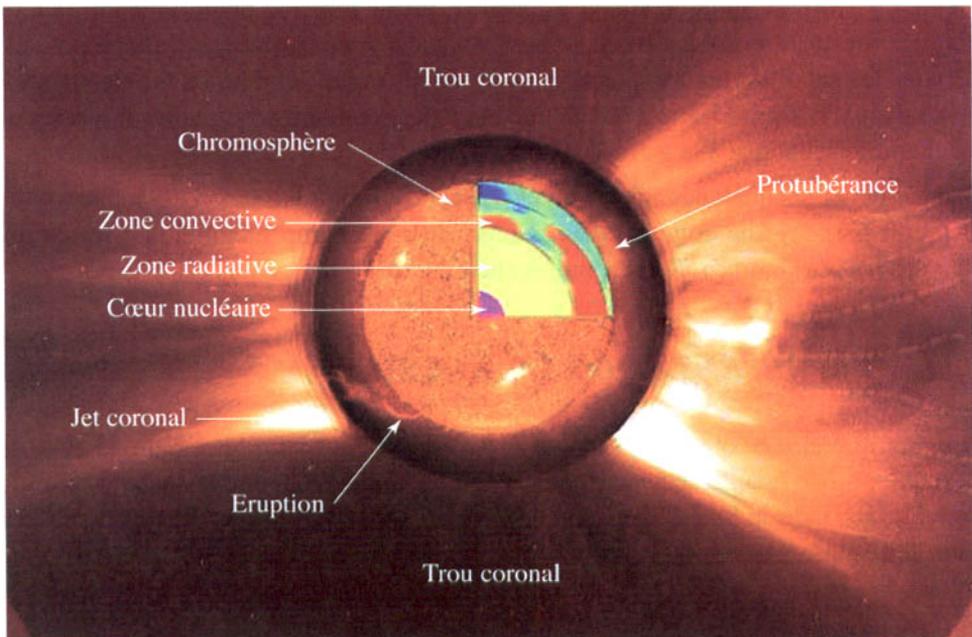


Figure 1.6 - Structure du Soleil à partir de différents instruments à bord du satellite SOHO (sources SOHO/MDI pour la coupe interne, EIT pour la chromosphère, LASCO pour la couronne solaire)

4. LA STRUCTURE INTERNE DU SOLEIL

Au plus profond du Soleil, le four nucléaire occupe une sphère de 200 000 kilomètres de rayon où est concentrée 50 à 70% de la masse totale de l'étoile. Comme nous l'avons déjà décrit, l'hydrogène s'y transforme en hélium par fusion nucléaire. Ces réactions s'accompagnent d'une perte de masse liée à une émission d'énergie selon la célèbre formule $E = mc^2$ dans laquelle E est l'énergie produite par une masse m, et c la vitesse de la lumière dans le vide¹². Chaque seconde, 700 milliards de kilogrammes d'hydrogène se transforment en 695,7 milliards de kilogrammes d'hélium. La majeure partie (98%) de l'énergie est évacuée sous forme de photons¹³.

Au centre du Soleil, la concentration est de 5×10^{31} particules par mètre cube (à comparer avec celle de l'atmosphère terrestre au sol qui est de l'ordre de 10^{25} particules par mètre cube). La masse volumique est de 150 tonnes par mètre cube, la pression d'environ 220 milliards de fois la pression atmosphérique, et la température de 15,6 millions de degrés. Le Soleil a commencé sa combustion nucléaire il y a environ 4,6 milliards d'années. Le centre est donc déjà appauvri en hydrogène, et on estime que le maximum de la source actuelle de production d'énergie se situe à environ 0,1 rayon solaire du centre.

Comment peut-on savoir cela sans le voir ? Par la modélisation des expériences réalisées et par le calcul, on montre qu'aucune énergie connue ne pourrait produire ce que produit le Soleil hormis la fusion nucléaire. Considérant la quantité de lumière qui sort du Soleil, on ajuste la quantité de matière qu'il faut pour la produire. En analysant cette lumière et la composition de l'espace interstellaire, on connaît la composition du Soleil, et donc la masse du cœur.

Tableau 1.3 - Comparaison de quelques paramètres solaires du cœur à la photosphère

	Concentration [m ⁻³]	Pression [atm]	Température [°C]	Profondeur [km]
Centre	5×10^{31}	220×10^9	$15,6 \times 10^6$	- 700 000
Interface zone radiative/cœur	$1,4 \times 10^{31}$	30×10^9	8×10^6	- 500 000
Interface zones convective/radiative	$1,7 \times 10^{28}$	6×10^6	$1,3 \times 10^6$	- 150 000
Photosphère	$6,6 \times 10^{19}$	0,12	6 000	0
Atmosphère terrestre au niveau de la mer	10^{25}	1	15	0

12 $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$, qu'on arrondit le plus souvent à $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

13 Le photon est une petite quantité d'énergie lumineuse. Pour une lumière de fréquence ν (en hertz), l'énergie E (en joules) du photon est donnée par $E = h\nu$, où h est la constante de Planck ($= 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$).

Tout n'est pas connu pourtant. Par exemple, les 2% restant de l'énergie solaire s'évacuent sous la forme de particules probablement sans masse, les neutrinos. Or, à l'heure actuelle, la théorie en prédit davantage que n'en mesurent les instruments ¹⁴.

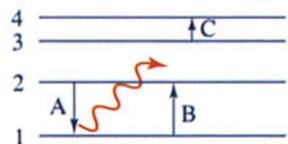
L'énergie produite dans le four nucléaire doit traverser diverses couches avant de pouvoir voyager dans l'espace. La première, la *zone radiative*, s'étend d'environ 0,3 à 0,8 rayon solaire. La concentration y décroît de $1,4 \times 10^{31}$ à $1,7 \times 10^{28}$ particules par mètre cube depuis sa face interne (vers le centre du Soleil) vers sa face externe. La rotation de cette zone est probablement rigide, c'est-à-dire qu'elle tourne d'un bloc ¹⁵. Entre la moitié et un tiers de la masse totale du Soleil est inclus dans cette zone radiative, avec une pression qui décroît du centre vers l'extérieur d'environ 30 milliards à 6 millions d'atmosphères, et une température qui décroît de 8 à 1,3 millions de degrés. Comme les zones suivantes, elle est transparente aux neutrinos, qui la traversent en 2 secondes environ. Par contre, il faut à l'énergie transportée par les photons plusieurs millions d'années pour en sortir : certains sont absorbés, d'autres sont réémis ¹⁶, et ce un grand nombre de fois, ce qui a pour effet en particulier d'élargir leur spectre lumineux.

Au terme de ce long périple, les photons débouchent sur une zone agitée, la *zone convective*, dans laquelle protons et électrons tourbillonnent en formant des cellules. La convection correspond à un mouvement de brassage de la matière : du gaz chaud monte, se refroidit en cédant son énergie aux couches superficielles de l'atmosphère solaire avant de redescendre. Ainsi, dans la région externe de la zone convective, à la surface du Soleil, la température n'est plus que d'environ 6 000 degrés. Si ce brassage ne s'effectue pas de manière parfaitement cohérente, son observation – qui a donné naissance à une branche de l'astrophysique appelée sismologie solaire – a toutefois montré une variation périodique de 5 minutes des vitesses verticales. Vues de la Terre, ces cellules ressemblent à des grains de riz. On les appelle pour cette raison des *granules*. Le diamètre moyen d'une granule est 1 200 kilomètres, et la distance entre les centres des granules est en moyenne de 1 500 kilomètres. Ce sont donc d'énormes bulles de soupe qui montent et descendent à la surface du Soleil ! En moyenne une

14 Une théorie récente prédit que les trois espèces de neutrinos oscilleraient entre elles, ce qui pourrait expliquer l'écart observé.

15 Là encore, la mesure est indirecte. On a accès aux déformations du Soleil dues à la rotation, desquelles on déduit qu'une zone radiative en rotation non rigide ne serait pas compatible avec les observations.

16 Si on schématise des niveaux d'énergie d'électrons par un petit diagramme très élémentaire comme indiqué ci-dessous, le saut de l'électron A du niveau 2 (énergie E_2) au niveau 1 (énergie E_1) crée un quantum d'énergie, un photon d'énergie E correspondant à une lumière de fréquence ν telle que : $E = E_2 - E_1 = h\nu$. Au contraire, les sauts d'électrons B et C nécessitent l'apport d'une énergie extérieure, par exemple celle de photons. Dans le cas de la figure, l'énergie du photon absorbé dans le saut B est plus grande que celle dans le saut C.



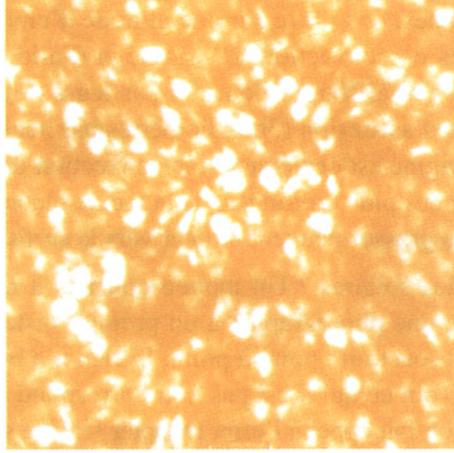


Figure 1.7 - Cette image de la granulation solaire a été prise le 20 juin 1999, avec THEMIS, Télescope Héliographique pour l'Etude du Magnétisme et des Instabilités Solaires, l'un des très grands équipements du CNRS, développé en collaboration avec l'Italie
 Elle représente un carré d'environ 24 000 kilomètres de côté.
 (crédit THEMIS/CNRS/INSU/CNR)

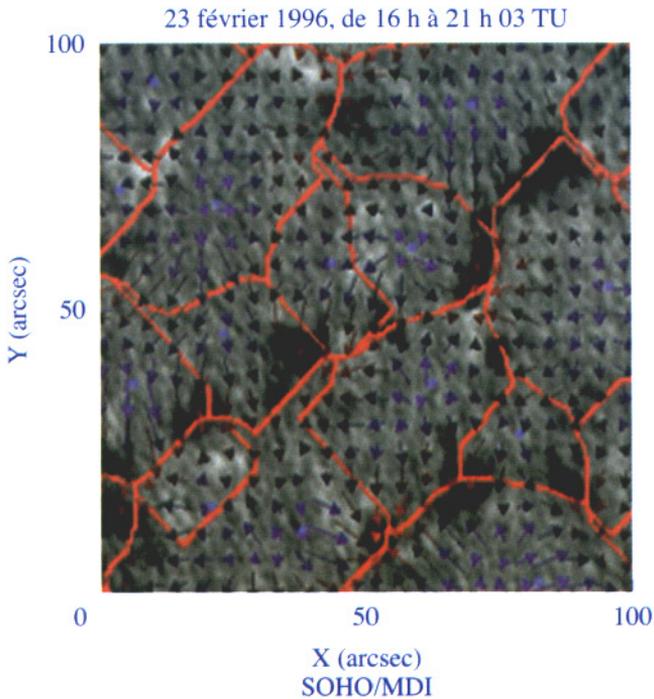


Figure 1.8 - Réseau de supergranulation superposé en rouge sur une photographie de l'instrument MDI à bord de SOHO
 Les flèches représentent la vitesse ascensionnelle des supergranules, le bleu allant vers le haut. Le côté de l'image représente environ 120 000 kilomètres.

granule persiste 18 minutes, et s'élève sur une altitude d'environ 200 kilomètres. Il existe plusieurs régimes de convection. D'origine et d'allure semblables aux granules, les *supergranules* en diffèrent pourtant par leurs dimensions (30 000 kilomètres), par leur vitesse d'ascension (360 kilomètres par heure) et par leur durée de vie (20 heures). Leur origine est également une convection de matière chaude, mais qui proviendrait de couches plus profondes, de la même façon que dans la casserole, des bulles plus ou moins grosses peuvent monter vers la surface.

Comment voir ces bulles solaires ? Un moyen consiste à ne regarder que ce qui bouge. On peut prendre une photographie à un premier instant, puis une autre une seconde plus tard, et les soustraire point à point. Si rien n'a bougé, la différence des images est toute noire. Tout ce qui n'est pas noir correspond à un mouvement. Pour interpréter les résultats, on fait appel à l'effet Doppler¹⁷. Une supergranule qui monte correspond à une diminution de la longueur d'onde de l'onde lumineuse reçue. Pour l'observateur, cela résulte en un décalage vers le bleu de la couleur. Lorsque la supergranule descend, la longueur d'onde de l'onde lumineuse reçue augmente, ce qui résulte en un décalage vers le rouge. Par l'étude des différences d'images, il est possible de dire non seulement ce qui a bougé, mais également dans quelle direction se produit le mouvement par rapport à l'observateur.

C'est sur ce principe qu'est basée la photographie du Soleil de la figure 1.9. Elle révèle en tout premier lieu que le Soleil tourne sur lui-même. En effet, la partie gauche s'approche de l'observateur dans cette rotation, et la partie droite s'en éloigne, donnant ce beau dégradé de couleur. Il faut encore soustraire cette rotation moyenne, et retraiter l'image pour mettre ses principales caractéristiques en valeur. On observe le résultat sur la figure 1.10.

Ce traitement de l'image révèle des bulles plus ou moins grosses, des granules ou supergranules. En observant de nombreux clichés de ce type, on a constaté dès 1960 que les apparitions et disparitions de granules avaient une périodicité de 296 secondes (avec une incertitude de ± 3 secondes). Rapidement, on supposa que l'origine du phénomène se trouvait à l'intérieur de notre étoile : on avait ainsi trouvé un moyen indirect d'étudier l'intérieur du Soleil.

Ainsi, les zones radiative et convective se distinguent par leur dynamique. La première possède une rotation rigide, uniquement zonale c'est-à-dire avec une vitesse perpendiculaire à l'axe de rotation du Soleil, probablement plus lente (29 jours environ)

17 La vitesse v de déplacement d'un corps qui émet une lumière de longueur d'onde λ peut être calculée par la différence $\Delta\lambda$ entre la longueur d'onde de la lumière observée et celle de la lumière émise. La relation est : $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = c \frac{\lambda_{\text{observé}} - \lambda_{\text{émis}}}{\lambda_{\text{émis}}}$. Dans cette convention, v est positive lorsque le corps source de la lumière s'éloigne de l'observateur. On trouvera en annexe 5 la démonstration de la formule précédente.



Figure 1.9 - Cette photographie du Soleil a été prise par l'instrument MDI à bord de SOHO, le 30 mars 1996

MDI fonctionne en utilisant l'effet Doppler. Les couleurs les plus sombres correspondent à un mouvement de 2 500 mètres par seconde vers l'observateur, et le blanc à un mouvement de 2 000 mètres par seconde vers l'arrière (crédit Stanford Lockheed Institute for Space Research ; SOHO/MDI).

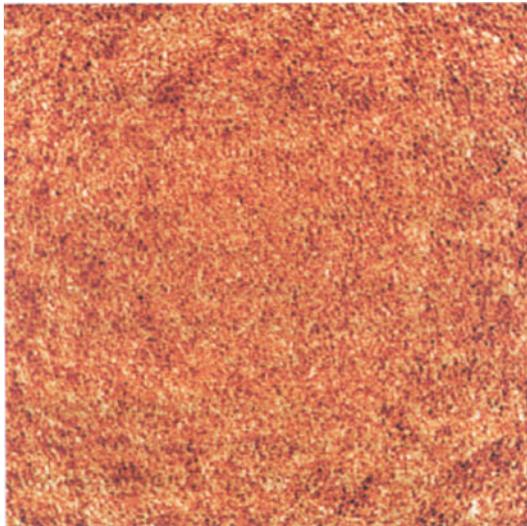


Figure 1.10 - Une partie du Soleil après traitement de l'image 1.9

Les couleurs les plus sombres correspondent à présent à un mouvement de 50 mètres par seconde vers l'observateur, et le blanc à un mouvement de 50 mètres par seconde vers l'arrière (crédit SOHO/MDI).

que la rotation fluide. A l'interface entre les deux zones existe une friction de particules chargées qui crée des courants appelés "courants de dynamo". On estime que c'est dans ces courants électriques que le champ magnétique solaire à grande échelle (c'est-à-dire au moins pour les composantes dipolaire et quadripolaire) trouve son origine. Les flux de matière qui se dirigent de l'équateur vers les pôles à la surface et des pôles vers l'équateur en profondeur contribuent très probablement à l'établissement du champ magnétique et à ses variations temporelles.

Comme c'est le cas de toutes les sciences, l'astronomie a considérablement progressé au cours du 20^{ème} siècle. Que savait-on du Soleil, il y a 100 ans ? En l'absence des connaissances de la physique nucléaire, son énergie était supposée provenir des seules collisions de sa matière condensée.

"Dans l'hypothèse que la matière nébuleuse ait été dans l'origine d'une ténuité extrême, on a calculé la quantité de chaleur qui a pu être engendrée par la chute de toutes ces molécules vers le centre, par la condensation à laquelle on doit la naissance du système solaire. En supposant que la chaleur spécifique de la masse condensante ait été celle de l'eau, la chaleur de la condensation aurait suffi à produire une élévation de température de 28 millions de degrés centigrades (...). Le mouvement de condensation a suffi, et bien au delà, pour produire la température actuelle du Soleil, et la température originaire de toutes les planètes (...). Au gré actuel de l'émission, la chaleur solaire produite par la condensation antérieure de sa masse durerait encore vingt millions d'années."

(C. FLAMMARION, *L'Astronomie populaire*, 1882)

5. LA PHOTOSPHÈRE, LE RAYONNEMENT SOLAIRE, LE VENT SOLAIRE

La *photosphère* est la "surface" visible du Soleil. Elle mérite une place à part dans la description de notre étoile, car elle est le lieu d'où s'échappe la majeure partie du rayonnement et du vent solaire. Elle constitue une frontière évidente, siège des granules, des supergranules, mais aussi d'autres phénomènes, tels les filaments ou les taches solaires, abordés dans ce même chapitre.

La photosphère est le lieu d'émission de 99% du rayonnement total. La puissance rayonnée est de l'ordre de 4×10^{26} watts (soit environ 260 millions de watts par mètre carré de surface solaire) dont la Terre ne reçoit au niveau des nuages que $1,743 \times 10^{17}$ watts ou encore 1366,1 watts par mètre carré de surface terrestre éclairée par le Soleil au zénith. Ce dernier nombre est aussi appelé *constante solaire*, en dépit du fait qu'il n'est probablement pas aussi constant qu'on se l'imaginait il y a quelques années encore.

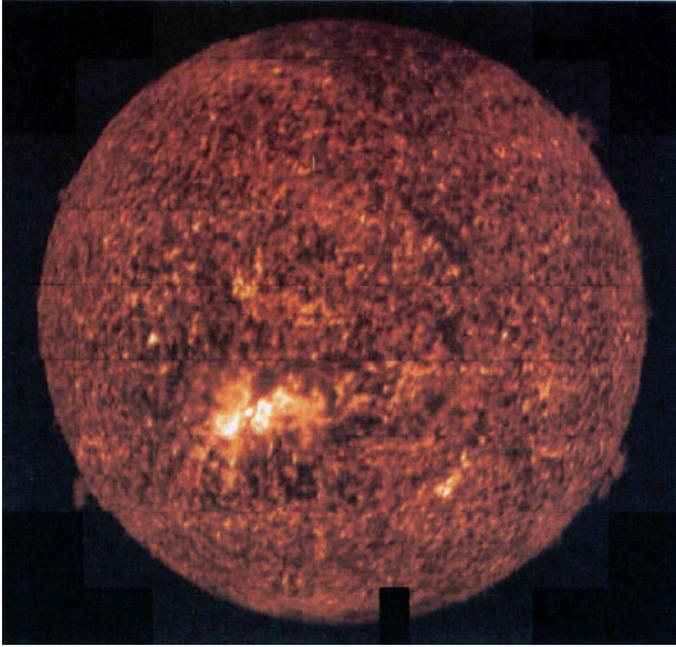


Figure 1.11 - Photographie de la photosphère réalisée avec un filtre sélectionnant la lumière de longueur d'onde 58,4 nanomètres (raie de l'hydrogène neutre), le 28 août 1996
 Il s'agit d'un montage de 11 heures d'observations à haute résolution.
 (crédit CDS/SOHO)

Son spectre de rayonnement est proche de celui d'un corps noir¹⁸ à 5 777 kelvins. Un corps noir est un système thermodynamique rayonnant à sa propre température d'équilibre. Les propriétés d'un corps noir, en particulier de son spectre, ne dépendent que de la température : la puissance totale émise sur tout le spectre par unité de surface (ou émittance) varie en fonction de la puissance quatre de la température. La constante de proportionnalité s'appelle la constante de Stefan, et vaut $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Ainsi, si une plaque de cheminée peut être assimilée à un corps noir, plus sa température s'élève et plus elle rayonne vers la pièce qu'elle chauffe.

Le spectre du corps noir peut être calculé à l'aide d'une formulation due à PLANCK en 1901. Sur la figure 1.12, nous avons représenté en bleu le spectre d'un corps noir à 5 777 kelvins, et en rouge le spectre mesuré du Soleil. Les écarts sont en particulier dus à des absorptions de raies dans les milieux traversés entre la photosphère et l'observation, mais aussi au fait que le rayonnement du corps noir suppose un équilibre thermodynamique, ce qui n'est pas rigoureusement le cas sur le Soleil. Toutefois, on peut remarquer que ces écarts restent faibles.

¹⁸ On trouvera en annexe 6 une présentation des grandeurs photométriques et en annexe 7 une présentation du corps noir, ainsi que les relations les plus utilisées le concernant (lois de Wien, Stefan, Planck).

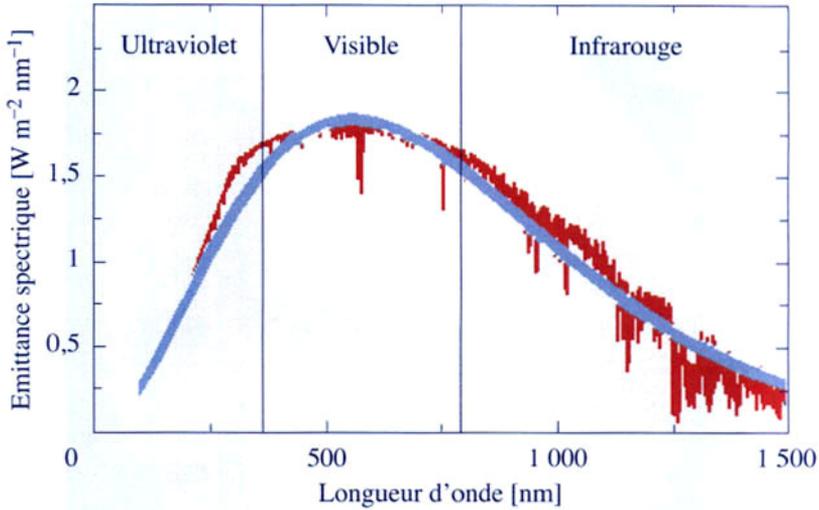


Figure 1.12 - Comparaison du spectre du corps noir à 5 777 kelvins (courbe bleue) avec le spectre solaire (courbe rouge)



Figure 1.13 - Spectre solaire obtenu en 1972, au sommet de la Jungfrau à 3 600 mètres d'altitude
L'abscisse va de 300 nanomètres (à gauche) à 1 000 nanomètres (à droite).
(crédit L. Delbouille, L. Neven, G. Roland, BASS 2000)

La caractéristique principale du rayonnement visible du Soleil est sa stabilité. Son analyse montre qu'il couvre toutes les couleurs¹⁹. Cependant, quelques longueurs d'onde émises par la photosphère sont absorbées dans l'atmosphère solaire. Aussi, dans un spectre solaire, peut-on distinguer ce qui est raies émises et raies absorbées (on parle alors de spectre en émission ou en absorption). La figure 1.13 montre l'ensemble des couleurs du rayonnement visible du Soleil.

Lorsqu'en 1901 PLANCK présenta une théorie, il était loin de suspecter la présence d'un rayonnement solaire invisible aussi intense²⁰. En 1937, SAHA montra que l'excitation de l'azote atmosphérique ne pouvait s'expliquer que par la présence de rayonnement aux photons plus énergétiques que ceux du visible, et en nombre au moins un million de fois plus important que ce que prédit PLANCK. Il fallut attendre 1946 pour que les premières expériences à bord de fusées mesurent effectivement les petites longueurs d'onde du rayonnement solaire : l'ultraviolet, puis les rayons X et enfin le rayonnement gamma, ce dernier étant le produit de désintégrations radioactives. La

19 On doit à FRAUNHOFER (1787-1826) l'invention du spectroscopie avec lequel plusieurs raies du spectre solaire furent dissociées.

20 On trouvera en annexe 8 une présentation des gammes de rayonnement.

caractéristique majeure des rayonnements UV et X est qu'ils varient énormément, d'heure en heure, de mois en mois, d'année en année. Le flux ultraviolet peut doubler, le flux X être multiplié par trente. Parmi eux, l'ultraviolet est le plus abondant. Malheureusement, les instruments qui en mesurent le spectre sont lourds et difficiles à embarquer à bord de satellites.

La photosphère n'est pas seulement le lieu principal d'émission d'ondes électromagnétiques dans l'espace. Elle est aussi le lieu d'émission de particules qui constituent ce que l'on appelle le vent solaire. Il s'agit d'un phénomène intimement lié à la présence d'un champ magnétique solaire. Nous avons souligné qu'il existe des composantes à grande échelle du champ magnétique, dont l'origine se trouve probablement à l'interface entre les zones convective et radiative (voir figure 1.4). Le foisonnement magnétique de surface du Soleil (voir figure 1.5) trouve quant à lui son origine dans les mouvements convectifs de la matière ionisée, qui génèrent de très nombreux champs magnétiques locaux. Mais de même que des particules chargées en mouvement génèrent un champ magnétique, de façon symétrique, un champ magnétique conduit les particules électriquement chargées le long de ses lignes de champ ²¹.

Imaginons à présent un mouvement convectif de plasma qui crée, localement sur le Soleil, un champ magnétique avec un pôle nord local et un pôle sud local. Des lignes de champ rejoignent ces pôles, autour desquelles transite du plasma. En outre, sous l'effet du bouillonnement de la photosphère, une éjection du plasma vers l'extérieur du Soleil à une vitesse de 700 000 à 2,5 millions de kilomètres à l'heure se rajoute au déplacement le long de la ligne de champ. De façon imagée, les lignes de champ magnétique emportées par le plasma sont étirées vers l'extérieur du Soleil, vers l'espace interplanétaire, tout en gardant leurs pieds sur le Soleil.

Lorsqu'il a quitté le Soleil, ce champ reçoit le qualificatif "d'interplanétaire" et le plasma celui de "vent solaire". Dans le cas solaire, il est impossible de distinguer ce qui, du champ ou du mouvement de plasma, génère l'autre. On les dit "gelés" l'un dans l'autre ²², ou encore qu'on se trouve dans la situation de flux gelé.

Cette description est celle d'un observateur sur le Soleil. Pour un observateur extérieur à l'étoile, se rajoute à ces mouvements de particules la rotation propre du Soleil. L'effet est tout à fait le même que celui du mouvement imprimé à l'eau expulsée d'un arrosoir de jardin rotatif : une fourmi sur l'arrosoir verrait l'eau s'expul-

21 On appelle ligne de champ magnétique la courbe tangente en tout point au champ magnétique local. Comme l'équateur ou les isobares d'une carte météorologique, une ligne de champ n'a pas d'existence matérielle, mais constitue un guide pour la représentation physique (voir en annexes 3 et 4).

22 Cela se traduit, vis-à-vis des équations de l'annexe 9 sur l'électromagnétisme, par la stationnarité des forces électromagnétiques, soit $q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B} = 0$ dans lequel \vec{E} est le vecteur champ électrique, \vec{B} le vecteur champ magnétique, \vec{v} la vitesse de la particule de charge q .

ser tout droit (radialement), mais le jardinier la voit décrire une spirale dite “spirale d’Archimède”. Vu de la Terre, le champ magnétique interplanétaire ne paraît donc pas arriver tout droit du Soleil, mais de sa bordure ouest (qui correspond également à la bordure ouest de la Terre pour un observateur côté jour), d’où il vient fouetter l’environnement spatial en une gracieuse courbe d’est en ouest pour ce même observateur (figure 1.14).

L’angle Ψ que fait une ligne de champ avec l’axe radial (le Soleil étant pris comme origine) en un point donné dépend de la vitesse d’éjection du vent solaire. Au niveau de la Terre, il est de l’ordre du radian (ou environ 60°) pour une vitesse moyenne de vent de 370 km s^{-1} . Les particules ont alors parcouru la distance de 1,4 UA ²³ le long de cette trajectoire.

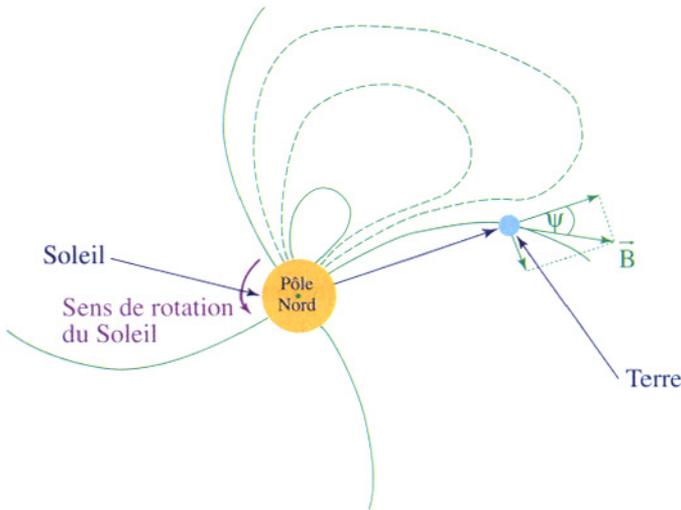


Figure 1.14 - La spirale d’Archimède

Les lignes représentent indifféremment le champ magnétique interplanétaire ou la trajectoire du plasma solaire gelé.

23 Au niveau de l’orbite terrestre, l’angle Ψ que fait la spirale d’Archimède avec l’axe liant le Soleil à la Terre, mesuré côté nuit, s’exprime en fonction de la vitesse V (km s^{-1}) d’échappement du vent solaire selon : $\Psi = \frac{23\,150}{V}$ si Ψ est exprimé en degrés, et $\Psi = \frac{404}{V}$ lorsqu’on l’exprime en radian.

La longueur L (en Unités Astronomiques) de la ligne de champ magnétique reliant la Terre et la photosphère est alors : $L = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\Psi^2 + 1} + \frac{\text{Ln}\Psi + \sqrt{\Psi^2 + 1}}{\Psi} \right)$, où Ψ est exprimé en radian. Pour un vent moyen de 370 km s^{-1} , l’angle obtenu est de $62,6^\circ$ ($\approx 1 \text{ rd}$) et la longueur L de $\approx 1,4 \text{ UA}$.

On vient de décrire un premier processus d'échange de particules entre la surface du Soleil et son atmosphère. Cette émission est permanente et concerne la plus grande partie de la photosphère, zone du Soleil appelée "calme". La puissance émise dans l'éjection de ces particules est de l'ordre de 10 000 watts par mètre carré de la surface solaire, ce qui peut paraître faible en regard de la puissance rayonnée en lumière. Pourtant, l'influence de ce vent solaire se révèle très importante en météorologie de l'espace.

Tableau 1.4 - Paramètres du vent solaire à 1 UA

	Maximum observé	Minimum observé	Valeur nominale
Nombre de particules par m ³	83 × 10 ⁶	≈ 0	5 × 10 ⁶
Vitesse [km s ⁻¹]	950	250	370
Intensité totale du champ magnétique interplanétaire [nT]	85	≈ 0	6
Intensité de la composante nord-sud du champ magnétique interplanétaire [nT]	27	- 31	0

La concentration moyenne du vent solaire au niveau de la Terre est de 5 millions de particules par mètre cube, c'est-à-dire grossièrement 5 × 10⁹ fois moindre que celle de l'air que nous respirons. La température va de quelques centaines de milliers à quelques millions de degrés. Néanmoins, cette notion de température revêt une signification tout à fait différente de celle que nous connaissons dans le langage courant. La température de l'air par exemple résulte des échanges thermiques dus aux collisions entre particules. Si l'air nous communique sa chaleur, c'est à travers les collisions de molécules diverses sur notre peau. Ainsi, la température est une grandeur statistique, une moyenne sur un nombre infini de chocs.

Mesurer la température d'une particule unique semble alors vain, puisque étant seule, elle ne peut échanger de la chaleur. C'est à peu près ce qui se passe dans le vent solaire : comme les particules sont peu nombreuses, allant grossièrement dans la même direction, elles ont une probabilité très faible de se rencontrer. En moyenne, sur les 200 millions de kilomètres qui séparent le Soleil et la Terre (en tenant compte de la spirale d'Archimède), elles ont ... moins de 5 risques de collision ! Par température nous entendons donc la correspondance en vitesse des particules : plus elles sont chaudes, plus elles sont rapides ou en d'autres termes, énergétiques au sens de l'énergie cinétique²⁴.

24 Pour un gaz à la température T, la mécanique statistique donne l'expression de l'énergie cinétique E_c en fonction de la masse m d'une molécule et de sa vitesse quadratique

$$\text{moyenne } E_c = \frac{N_{ddl}}{2} k_B T = \frac{1}{2} \overline{mv^2}. N_{ddl} \text{ est le nombre de degrés de liberté du gaz. Dans}$$

l'atmosphère terrestre, pour les particules neutres, il est égal à 3 car le gaz peut bouger librement dans les trois directions (on néglige la pesanteur). Dans l'atmosphère solaire, nous admettons que les contraintes magnétiques réduisent le nombre de degrés de liberté à

$$2, \text{ si bien que } E_c = k_B T = \frac{1}{2} \overline{mv^2}.$$

Jusqu'en 1995, les seules données concernant le vent solaire étaient issues de mesures faites le long de l'orbite de rotation de la Terre, c'est-à-dire à une Unité Astronomique et dans le plan de l'écliptique. Depuis, notre connaissance s'est enrichie des données de la sonde ULYSSES qui mesure le vent solaire pôle à pôle à une distance du Soleil d'environ 1,3 UA. Auparavant, deux modèles contradictoires de vent solaire coexistaient. Tous deux étaient basés sur des observations faites dans le plan de l'écliptique. Le premier prévoyait une augmentation graduelle de la vitesse du vent solaire depuis l'équateur solaire jusqu'aux pôles, tandis que le second postulait que la vitesse connaîtrait un maximum à moyenne latitude. Aucun de ces modèles ne s'est trouvé confirmé : ULYSSES a constaté qu'il existe deux régimes de vent solaire distincts. Entre 20° sud et 20° nord de latitude héliosphérique²⁵ (incluant donc le plan de l'écliptique), le vent solaire s'écoule avec une vitesse moyenne de 400 kilomètres par seconde (cette valeur est sujette à de fortes variations). Puis, en l'espace de moins d'une dizaine de degrés, la vitesse augmente jusqu'à atteindre 750 kilomètres par seconde. Le régime devient alors rapide, mais nettement moins perturbé. Ensuite, la vitesse croît doucement pour arriver, vers 80° de latitude à environ 800 kilomètres par seconde.



Figure 1.15 - Vue d'artiste du satellite ULYSSES tournant autour du Soleil, au-delà de l'orbite de la Terre qu'on voit au premier plan. Les échelles entre le Soleil et les planètes ne sont pas respectées. (crédit ULYSSES/ESA/NASA)

25 Qui se rapporte à la sphère solaire. L'héliosphère est la portion de l'espace soumise à l'influence de l'atmosphère solaire ; elle s'étend jusqu'à la frontière où le vent stellaire des autres étoiles s'oppose au vent solaire (entre 100 et 150 UA).

Les modèles prévoient que le flux du vent solaire devait décroître au-dessus des pôles. Il n'en est rien. Il existe bien une décroissance importante de la densité du vent solaire, mais en moyenne moins importante que l'augmentation de la vitesse. Si bien que le flux augmente faiblement au lieu de décroître.

6. L'ATMOSPHÈRE SOLAIRE : PROFIL THERMIQUE

Au-dessus de la photosphère commence l'*atmosphère solaire*, dont les observations se sont longtemps faites depuis la surface de la Terre en lumière blanche, lors d'éclipses. L'opacité naturelle de l'atmosphère de notre planète limite ces observations. De surcroît, on ne peut voir des détails que lorsqu'ils présentent une différence de brillance sur leur fond naturel. C'est le cas lorsque la différence de concentration ou de température entre une structure du Soleil et son environnement est significative. Jusqu'aux années 1990, notre description du Soleil était abusée par nos sens : nous n'étions pas capables de voir l'évolution de ces structures, traversant des zones de l'atmosphère solaire de différentes caractéristiques macroscopiques, et donc possédant des brillances qui évoluaient dans l'espace, pour parfois disparaître. Il est donc nécessaire, pour étudier l'atmosphère solaire, de commencer par détailler le profil thermique de sa surface à la couronne.

Notre connaissance est largement basée sur le principe observationnel suivant : lorsque des atomes reçoivent de la chaleur, l'énergie thermique peut arriver à excéder l'énergie électromagnétique qui maintient les électrons dans une situation donnée par rapport à leurs noyaux atomiques. Un électron est libéré et l'atome ionisé. Plus la température augmente, plus les ions ainsi créés perdent leur cortège électronique. Des atomes à plusieurs électrons vont ainsi se transformer en ions de plus en plus chargés (positivement) lorsque la température croît. Sur le Soleil, on trouve du fer ionisé jusqu'à quinze fois. Or, lorsque des particules sont excitées, elles se dés excitent par un rayonnement de longueur d'onde caractéristique, une sorte de signature. Il s'agit donc d'observer le Soleil à des longueurs d'ondes spécifiques pour mettre en évidence des ions spécifiques, et en conséquence, la température du milieu.

La photosphère ne possède pas une température uniforme. En allant vers l'espace, la température y décroît d'environ 1 000 degrés sur une épaisseur de 500 kilomètres environ (elle varie au gré des mouvements granulaires). Comme nos éjectats d'eau bouillie, la matière solaire est propulsée en permanence entre granules et entre supergranules, sous forme de langues de protons et d'électrons qu'on appelle des *spicules* (entre les granules) ou *macrospicules* (entre les supergranules). Les caractéristiques essentielles des spicules sont un diamètre à la base de 1 000 kilomètres, une hauteur de 5 000 à 10 000 kilomètres, un nombre moyen de 30 par supergranule, une durée de vie de 8 minutes. Leur température est de l'ordre de 100 000 degrés. Si leur corrélation avec le champ magnétique est bien établie, leur origine est encore incertaine.

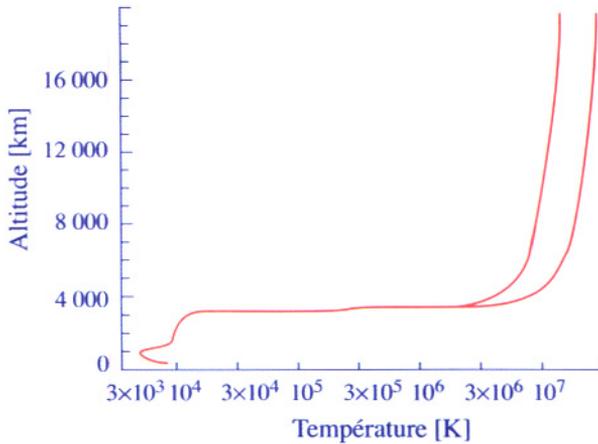


Figure 1.16 - Coupes thermiques de la couronne solaire

Les deux courbes correspondent au cas du Soleil calme (températures les plus basses), et à des mesures incluant l'émission des régions actives (températures les plus élevées). L'altitude zéro correspond au sommet de la zone convective (d'après G.W. Simon et co-auteurs, *Solar Physics*, volume 39, 1974).

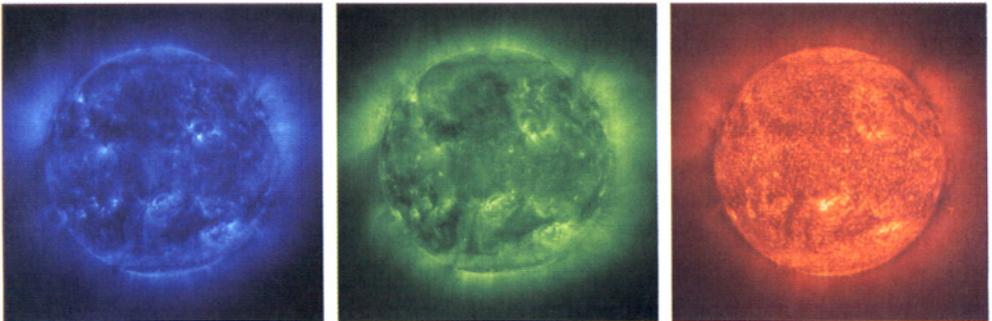


Figure 1.17 - Le Soleil photographié par l'instrument EIT à bord de SOHO

Les couleurs sont de fausses couleurs. En bleu, l'image est prise à 17,1 nanomètres le 11 août 1999. Ce rayonnement est émis par le fer ionisé huit ou neuf fois porté à 1 million de degrés environ. En vert, à la même date, ce rayonnement est émis par le fer ionisé onze fois à 1,5 millions de degrés et à une longueur d'onde de 19,5 nanomètres. En brun enfin, émission du fer ionisé quatorze fois à 28,4 nanomètres, photographié le 3 février 1996. La température est plus élevée et atteint 2 à 2,5 millions de degrés (crédit SOHO/EIT).

Juste au-dessus de la photosphère, et sur une épaisseur d'environ 1 500 kilomètres, la chromosphère²⁶ est une zone de croissance de la température. Sur cette faible distance, les électrons sont chauffés d'environ 6 000 degrés (la température passe de 6 000

²⁶ Lors d'éclipses de Soleil apparaît une frange de faible épaisseur de couleur rouge (qui trouve principalement son origine dans l'émission H α de l'hydrogène à 656,3 nanomètres). C'est en raison de cette apparence colorée qu'elle a reçu le nom de chromosphère.

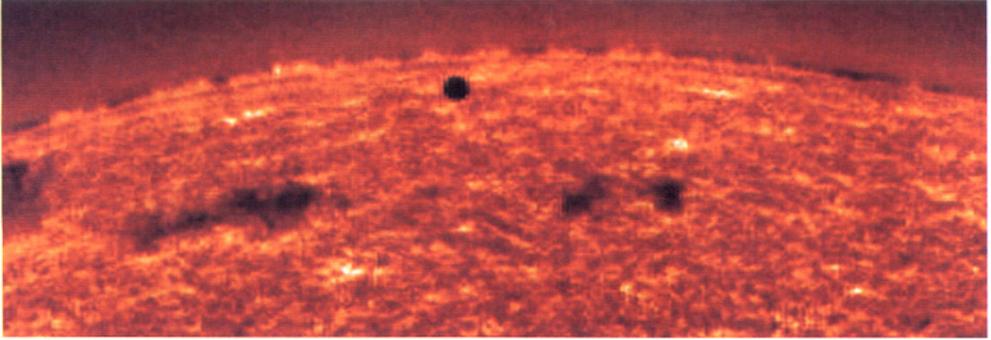


Figure 1.18 - Le 15 novembre 1999, Mercure essaie à son tour d'éclipser le Soleil
 Le satellite TRACE photographie l'événement. Sur la bordure de la couronne solaire, on distingue les spicules, flammèches s'élevant de la photosphère (crédit Big Bear Observatory (BBSO – Californie) ; New Jersey Institute of Technology (NJIT)).

à 12 000 degrés), ce qui correspond à une moyenne d'environ 4 degrés par kilomètre. La source de chauffage est bien sûr le rayonnement photosphérique, mais aussi une interaction magnétique encore mal modélisée. Les spicules, qui s'élèvent à plusieurs milliers de kilomètres, traversent la chromosphère. D'autres structures, horizontales celles-ci, transportent de la matière : les *fibrilles*. Il s'agit de structures sombres de matière relativement froide qui semblent délimiter les structures magnétiques de la chromosphère. Spicules, macrospicules et fibrilles forment des réseaux qui, en altitude, calquent ce qui, sur la photosphère, correspond aux granules et supergranules.

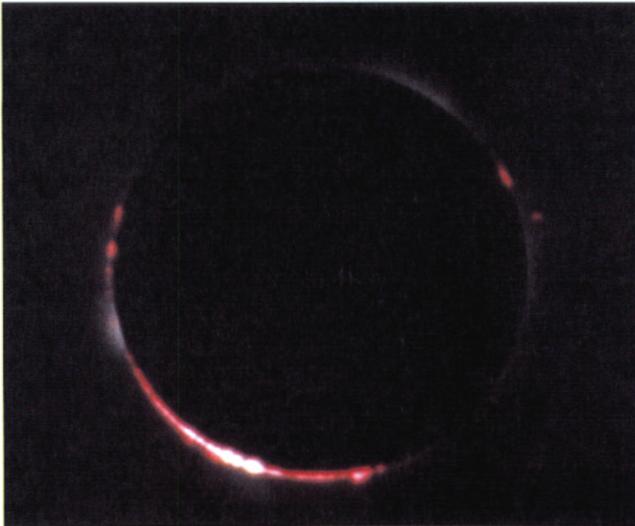


Figure 1.19 - La chromosphère apparaît nettement comme une frange d'atmosphère de couleur rose-rouge, sur cette photographie prise lors de l'éclipse du 11 août 1999
 (couronne externe observée au deuxième contact ; crédit P., N. et J.F. Mein, DASOP, Observatoire de Paris-Meudon).

A partir de la chromosphère, l'atmosphère solaire devenue plus chaude s'appelle la couronne solaire. C'est elle qui brille suffisamment pour être vue lors des éclipses totales. A partir de 2 500 à 3 000 kilomètres, la température passe brutalement de 12 000 degrés à plus d'1 million de degrés 1 000 kilomètres plus haut, soit une augmentation d'environ 1 000 degrés par kilomètre (voir figure 1.16). Puis, sur une quinzaine de milliers de kilomètres, elle continue à croître, pour atteindre plusieurs millions de degrés. Cette région s'appelle la région de transition.

Au-delà commence ce qu'on peut appeler la haute atmosphère solaire, baignée de son vent solaire et de son champ magnétique, dit "interplanétaire". De façon tout à fait classique, le vent peut être caractérisé par la pression cinétique qu'il produit. Peut-être moins familier est le fait que le champ magnétique, qui produit une force magnétique, peut lui aussi être caractérisé par une pression²⁷. Dans le cas du vent solaire, ces deux pressions sont tout à fait comparables.

7. LA DYNAMIQUE SOLAIRE

On sait depuis le dix-septième siècle que le Soleil connaît une activité variable. Mais, même en dehors des périodes les plus agitées, le Soleil fait preuve d'une dynamique d'une extrême amplitude. Ainsi, même si l'usage a consacré les adjectifs "calme" et "actif" pour caractériser l'activité solaire, tout est relatif : un Soleil appelé calme peut connaître des sursauts éruptifs qui l'affectent tout entier.

Dans le début de cet ouvrage, le Soleil et son atmosphère ont été présentés comme des empilements de sphères parfaites, symétriques, homogènes. L'étude de l'activité solaire montre que cette simplification est abusive. Notre compréhension du Soleil reste limitée : les observations les plus récentes ont mis à mal des modèles sans que l'on ait pu encore leur substituer d'autres mécanismes satisfaisants. Aussi, la présentation du Soleil ne peut, à l'heure actuelle, qu'être morphologique. De façon sans doute arbitraire, seront examinés quatre témoins de la dynamique solaire : les taches solaires, les trous coronaux, les éjections de masse coronale et enfin la structure à grande échelle des jets. Se produisant à des altitudes croissantes, ces phénomènes constituent des étages distincts, bien que certainement liés, de l'activité solaire.

7.1. TACHES SOLAIRES. CYCLE SOLAIRE. PROTUBÉRANCES ET ÉRUPTIONS

La figure 1.20 du Soleil montre la photosphère. On y distingue nettement des zones noires : ce sont les "taches solaires". Pour les observer facilement, on peut également prendre un tube assez large (de PVC pour le bâtiment par exemple) dont on bouche

27 L'annexe 10 donne des éléments en ce qui concerne la pression cinétique et la pression magnétique.

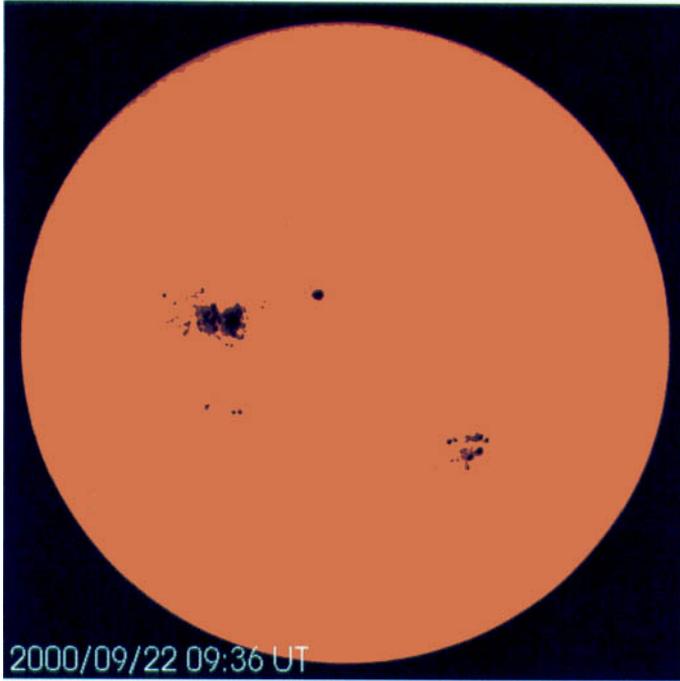


Figure 1.20 - Cette image montre le plus grand nombre de groupes de taches solaires observé pendant le cycle actuel (23^e), le 20 septembre 2000
La surface totale de la photosphère couverte par les taches représente plus de douze fois la surface totale de la Terre (crédit MDI/SOHO).

une extrémité avec une feuille de papier. Il faut percer un trou dans cette feuille, et diriger cette extrémité du tube vers le Soleil. De l'autre côté, poser une feuille blanche en guise d'écran, à bonne distance du tube. Cette distance dépend de la longueur du tube, et vous l'ajusterez pour obtenir une netteté suffisante de la projection du Soleil²⁸.

Les taches solaires, parfois groupées, sont plutôt localisées entre 40° de latitude nord et 40° de latitude sud. Elles semblent plus sombres parce que leur température est plus basse : 4 000 degrés environ. Elles brillent donc moins fort que la photosphère environnante. Leur diamètre peut excéder 300 000 kilomètres. Le champ magnétique dans les taches est 100 à 5 000 fois plus intense que celui environnant. Une tache grandit en quelques jours, un groupe de taches peut persister entre 10 et 100 jours. En raison de la facilité avec laquelle on peut les observer, il en existe un compte relativement précis depuis 1610, c'est-à-dire depuis l'invention du télescope. Le comptage

²⁸ Attention ! **Ne jamais observer le Soleil de ses yeux nus, ni avec de simples lunettes de soleil !** Vous pourriez vous brûler la rétine, peut-être de façon définitive, comme 27 personnes en France le jour de l'éclipse du 11 août 1999. Si vous possédez encore des lunettes d'éclipse dans un tiroir, ne les utilisez plus : elles peuvent avoir des micro-rayures qui laissent passer le rayonnement solaire. Ne les utilisez que si elles ont été conservées au sec, dans leur emballage d'origine, sans être pliées.

régulier date, lui, du dix-huitième siècle. On constate un comportement assez spectaculaire de ces taches : il existe des périodes de maximum au cours desquelles il peut y en avoir plus de 300, et des périodes de minimum sans tache du tout ! Depuis le début de leur observation régulière, la plus longue période sans tache a duré 70 ans. Il s'agit du minimum de Maunder, de 1645 à 1715 (sous le règne du Roi Soleil !). D'autres périodes de faible nombre de taches ont été observées, moins prononcées cependant : entre 1795 et 1830 (minimum de Dalton) et au début du vingtième siècle. Lorsque le nombre de taches est faible le Soleil est dit "calme". Au contraire, lorsqu'il est élevé, le Soleil est dit en "période active". Bien d'autres paramètres caractérisent l'activité solaire. La production du flux ultraviolet par exemple, déjà évoquée, varie de façon très similaire à la variation des taches.

Depuis environ 250 ans, le comportement du nombre de taches semble plus régulier. Si l'on part d'une période calme, sans tache, en attendant quelques mois, on observe leur formation vers la latitude 45° sud ou nord. Puis la zone de formation se rapproche de l'équateur au cours des cinq années qui suivent. Vers le maximum d'activité, 4 à 5 ans après le début du cycle, des taches nouvelles apparaissent vers la latitude de 5° , mais en nombre décroissant. Au bout d'environ 11 ans, le Soleil retrouve sensiblement son état initial. Ce cycle est appelé "cycle de Schwabe".

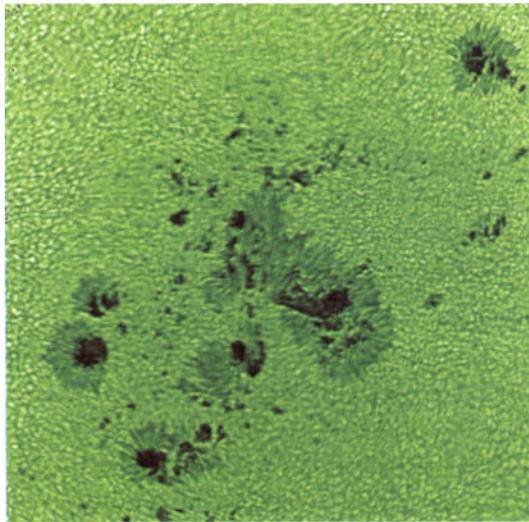


Figure 1.21 - Photographie de taches solaires dans la chromosphère observée dans la raie alpha de l'hydrogène (656,28 nanomètres) le 14 juillet 2000, enregistrée au Dunn's Solar Telescope du National Solar Observatory/Sacramento Peak Observatory

Un côté de ce carré représente 124 000 kilomètres. Cette image représente l'une des plus importantes éruptions solaires du cycle 23, appelée l'éruption de la prise de la Bastille. Cette éruption a été accompagnée d'une éjection de matière coronale se déplaçant à plus de 1 500 kilomètres par seconde (crédit S. Koutchmy, CNRS-France ; C. Viladrich).

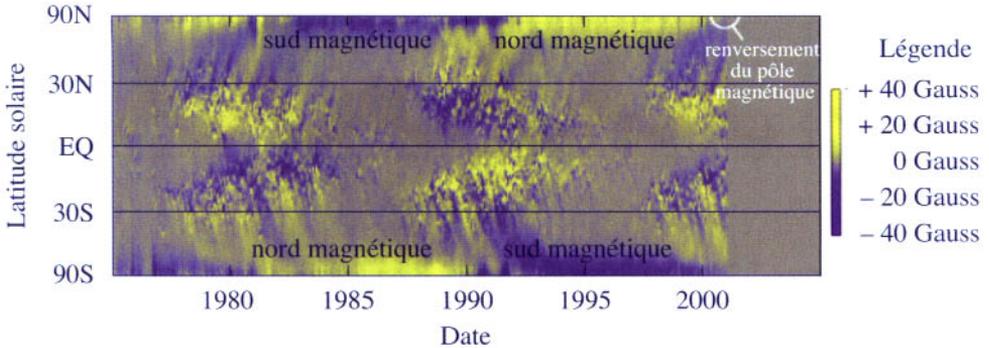


Figure 1.22 - Ce diagramme illustre le comportement

de l'activité magnétique solaire sur deux cycles solaires et demi (depuis 1975)

Les régions jaunes indiquent des champs magnétiques positifs (nord), et les régions bleues des champs magnétiques négatifs (sud). Ce diagramme s'appelle un diagramme papillon : on peut y voir une succession de papillons dont une aile serait bleue et l'autre jaune. La signification en est la migration des taches depuis les hautes vers les basses latitudes au cours du cycle. Le papillon se retourne d'un cycle à l'autre. On voit aussi sur ce diagramme le champ dipolaire se retourner aux pôles, ce qui se manifeste par le passage d'une couleur à l'autre (crédit Dr Hathaway, US National Solar Observatory – Kitt Peack ; NASA).

Ce cycle se complique si l'on considère le signe (sud ou nord, positif ou négatif) du champ magnétique dans les taches solaires. On constate alors le comportement suivant, qui reçoit parfois le nom de "loi de polarité de Hale" : la polarité des taches de tête dans l'un des hémisphères est l'opposée de la polarité dans l'autre hémisphère. De surcroît, ces polarités s'inversent d'un cycle au cycle suivant. D'un point de vue magnétique, le cycle solaire est donc plutôt vingt-deux ans que onze. En 1995 a commencé le 23^e cycle (les cycles sont datés à partir des premières observations régulières en mars 1755).

La polarité des taches n'est pas le seul indicateur magnétique de l'activité solaire. En réalité, le champ magnétique solaire tout entier possède un comportement marqué par cette inversion : tantôt, le pôle nord magnétique de la composante dipolaire pointe au nord géographique du Soleil, et tantôt au sud. L'inversion permet de dater précisément le maximum d'activité. Le dernier s'est produit en février 2001 pour le cycle 23, amenant le pôle nord magnétique au sud géographique de notre étoile, où il restera pendant un peu plus d'une dizaine d'années si le rythme des cycles solaires perdure. Ainsi, le Soleil possède une composante dipolaire de son champ magnétique qui est intense lorsque l'activité est calme, puis diminue jusqu'à disparaître et s'inverser au point culminant de l'activité solaire.

A l'heure actuelle, les modèles qui simulent la génération du champ magnétique solaire ne permettent pas d'expliquer à la fois cette inversion et celle de la polarité des taches. L'une se produit au maximum d'activité du cycle, l'autre au minimum, ce qui n'a pas encore été compris.

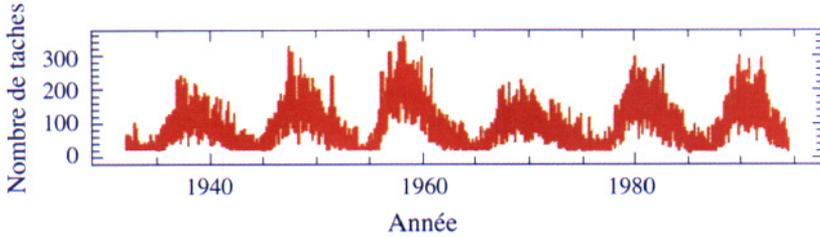


Figure 1.23 - Evolution de l'indice R en fonction des années
Le cycle d'environ 11 ans est particulièrement visible.

Le cycle des taches est caractérisé par plusieurs indices. Historiquement, l'indice de Wolf présente l'intérêt majeur d'être mesuré depuis 1848. Il tient compte du nombre de groupes de taches et du nombre de taches, mesurés à partir des instruments d'observation du dix-neuvième siècle. Pour en avoir un enregistrement continu, on utilise des facteurs de correction appliqués aux observations actuelles de façon à compenser leur trop bonne précision, et être en mesure de les comparer à ce que WOLF aurait observé avec son propre instrument. On utilise, avec d'autres normes d'observations, l'indice RI de taches mensuelles, et l'indice RI_{12} moyenné sur un an²⁹.

Comme les appareils sont de plus en plus sensibles, et qu'on cherche un indice qui puisse servir d'annale géophysique, on utilise un facteur de correction k_{corr} dépendant de l'appareil, qui tient compte de sa sensibilité d'observation, de façon que deux appareils de sensibilités différentes donnent le même nombre. Sur la figure 1.23, nous montrons l'évolution de R sur 63 ans. La variation est relativement régulière, déterminant le cycle d'activité solaire.

Le cycle de onze ans n'en est peut-être pas véritablement un. Il est possible que l'on soit abusé par la durée très courte d'observation. Peut-être les cycles varient-ils de tantôt 5 ans, tantôt 100, et ce d'une façon chaotique. C'est l'une des questions à laquelle tentent de répondre les astrophysiciens. Cette durée elle-même – 11 ans si l'on considère le nombre de taches, et 22 ans si on considère également leur polarité magnétique – interpelle. Elle n'est pas sans rappeler la durée qui est nécessaire à un élément de la surface pour migrer de l'équateur au pôle, puis du pôle vers l'équateur. Ces observations sont-elles celles de processus corrélés ou indépendants ? Et comment s'insère dans ce puzzle la pièce de l'inversion du champ dipolaire ? Ces questions restent encore sans réponse. A l'heure actuelle, nous n'arrivons pas à assembler en un tout cohérent des observations nombreuses mais encore éparpillées et sans doute fragmentaires.

²⁹ Les noms des indices sont figés par l'histoire. Ainsi, l'indice de Wolf s'appelle R, et dépend du nombre de groupes de taches G et du nombre de taches T : $R = k_{corr} (10 G + T)$.

L'indice moyen des taches mensuelles s'appelle RI_{12} . Il se calcule en utilisant la relation

$$RI_{12} = \frac{1}{12} \left(\frac{RI(-6)}{2} + \sum_{m=-5}^5 RI(m) + \frac{RI(+6)}{2} \right), \text{ où } RI(m) \text{ représente le nombre de taches au mois } m.$$

taches au mois m.

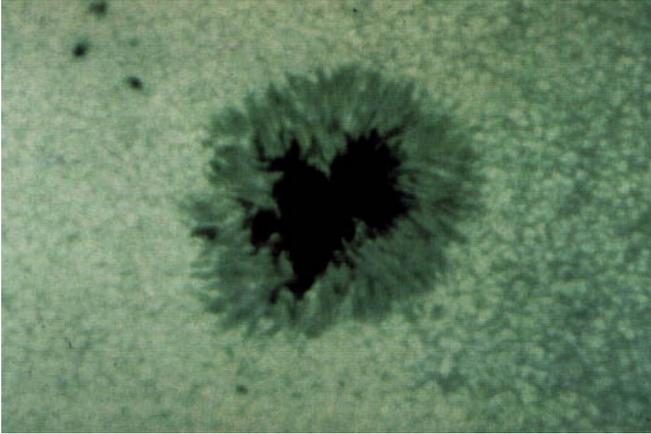


Figure 1.24 - Photographie d'une tache solaire et des granules environnantes
(crédit S. Koutchmy, IAP-CNRS)

Comment ces taches se forment-elles ? Le champ magnétique de surface du Soleil se manifeste par des lignes de champ perpendiculaires à la surface, mais qui existent aussi bien au-dessus qu'en dessous de la photosphère. C'est ce qui dirige nos éjectats de spicules. Or, la matière tourne plus lentement aux hautes latitudes qu'aux basses, et plus vite vers l'intérieur que vers la surface. Sous l'effet de ces rotations, les lignes de champ magnétique se déforment, s'enroulent, se torsadent... Leur configuration devient plus complexe, comme l'illustre la figure 1.5 ou la photographie 1.25.



Figure 1.25 - Le satellite TRACE visualise les boucles magnétiques
au-dessus de la photosphère

L'échelle de cette image est d'environ 100 000 kilomètres pour 5 centimètres. L'image est prise à 17,1 nanomètres, longueur d'onde caractéristique d'une émission à 1 million de kelvins (crédit TRACE-NASA).

Quand les lignes de champ deviennent très denses, il se produit une sorte de hernie au-delà de la surface, provoquant localement des tubes de champs magnétiques intenses, perpendiculaires à la surface. Dans cette zone, la matière se trouve freinée par les lignes de champ (ou organisée par elles), les apports de chaleur par des zones voisines se font mal, le gaz se refroidit, donnant naissance à une tache. Une fois formée, la tache est progressivement érodée par les mouvements de matière des supergranulations. Les lignes de champ, issues d'une tache, favorisent la dissipation d'énergie vers l'atmosphère immédiate, donnant naissance à des zones atmosphériques chaudes, qui peuvent se prolonger jusque dans la couronne solaire : les *plages chromosphériques*.

Quelques jours après leur apparition, un *filament* peut se former au-dessus des taches. Il s'agit d'une structure longue, qui semble plus sombre parce qu'elle s'élève depuis des couches basses, plus froides, vers des couches plus chaudes. On les voit alors en sombre sur fond clair (figure 1.27).

Cependant, si cette proéminence se produit sur le côté du Soleil (par rapport à nous), nous la voyons se détacher en clair sur le fond sombre du ciel comme une arche, qui peut monter jusqu'à 10 000 kilomètres dans la couronne : on l'appelle alors une *protubérance de région active*. Son champ magnétique peut atteindre 50 Gauss, soit 50 fois le champ dipolaire solaire. Notons que la base des protubérances n'est pas située sur les taches solaires, même si les deux phénomènes sont vraisemblablement liés. Il s'agit là encore d'une question ouverte de l'astrophysique solaire. En voici quelques autres : les protubérances sont-elles des boucles, des bulles, ou des arches ? Souvent, on les voit torsadées : elles ressemblent aux élastiques que l'on s'amuse à torturer en les vrillant jusqu'à ce qu'ils cassent ou se déroulent avec une grande rapidité. Dans ce phénomène, on stocke lentement de l'énergie dans l'élastique, et celui-ci la rend brutalement. Le phénomène est-il comparable dans les protubérances ?

Les taches sont connues depuis plusieurs siècles. Voici l'interprétation qu'en donnait C. Flammarion il y a plus de cent ans :

“Le Soleil s'éteindra. Il perd constamment une partie de sa chaleur, car l'énergie qu'il dépense dans son rayonnement est pour ainsi dire inimaginable... Si le Soleil se condense encore actuellement avec une vitesse suffisante pour compenser une pareille perte (...) cet astre ne se refroidit pas encore ; mais dans le cas contraire, sa période de refroidissement est déjà commencée. C'est ce qui est le plus probable, car les taches qui le recouvrent périodiquement ne peuvent guère être considérées que comme une manifestation du refroidissement. Le jour viendra où ces taches seront beaucoup plus nombreuses que de nos jours, et où elles commenceront à masquer une partie notable du globe solaire.”

(C. FLAMMARION, *L'Astronomie populaire*, 1882)

Une protubérance peut durer jusqu'à trois rotations solaires. Il arrive que dans une *plage chromosphérique*, un point brillant apparaisse qui, en quelques minutes, s'étend et couvre une surface de plus de 50 000 kilomètres de diamètre. Puis cet éclat diminue

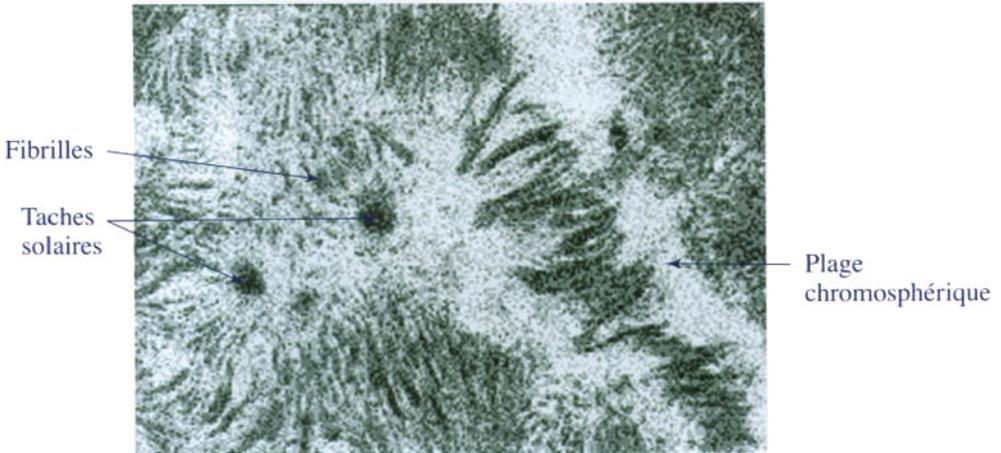


Figure 1.26 - Cette photographie, prise du Pic du Midi le 26 Août 1979 (rayonnement $H\alpha$), montre un centre actif au niveau chromosphérique avec un système de fibrilles, deux taches de polarités opposées et des plages chromosphériques
 (crédit Observatoire Midi Pyrénées-équipe solaire. Auteur : C.E. Alissandrakis)

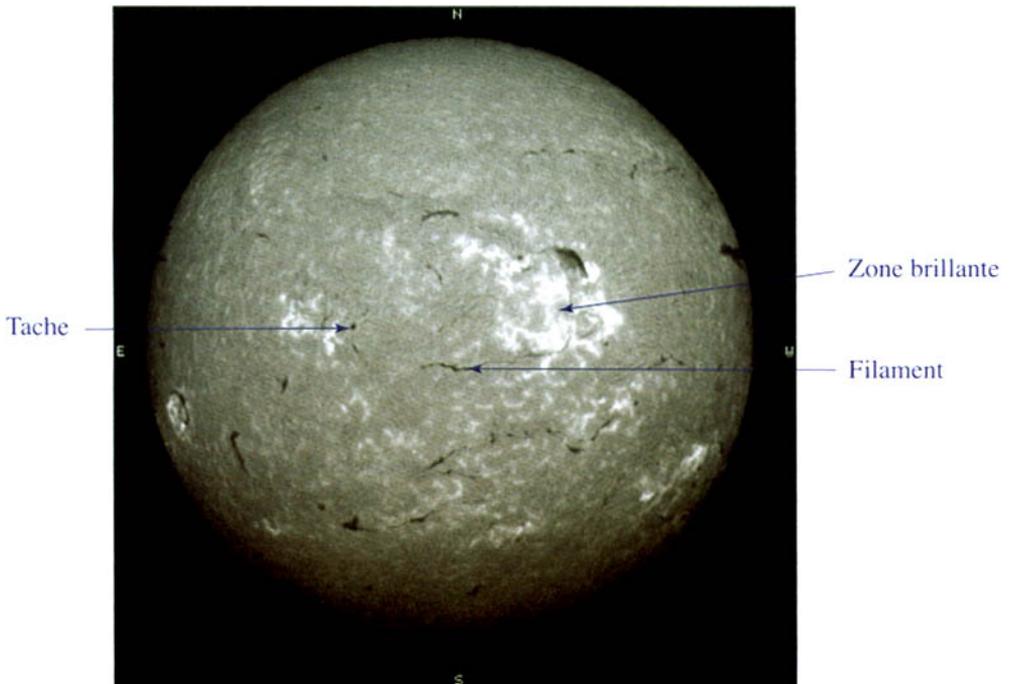


Figure 1.27 - Image de la photosphère, le 5 novembre 2000 (en période active), par le spectrohéliographe de Meudon en $H\alpha$ (656,3 nanomètres)
 On y voit de nombreux filaments, des taches solaires, des zones brillantes.
 (crédit DASOP, Observatoire de Paris-Meudon ; CNRS)

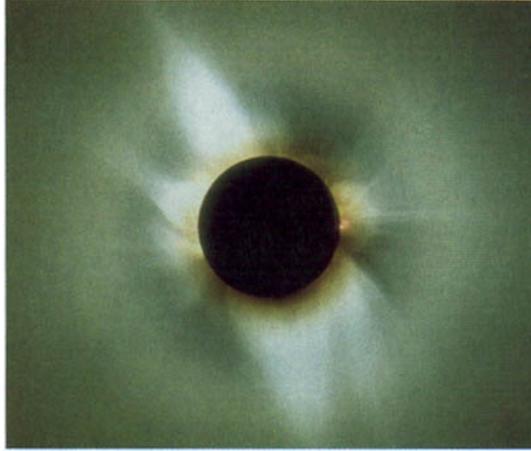


Figure 1.28 - On distingue une protubérance de région active sur le bord du disque solaire, photographiée en lumière blanche lors de l'éclipse totale de Soleil du 11 juillet 1991 depuis Mauna Kea à Hawaïi (crédit S. Koutchmy, IAP-CNRS)

en moins de 3 heures. Ce phénomène, appelé *éruption solaire*, est souvent précédé d'une protubérance locale : l'énergie piégée dans la protubérance se libère brutalement : jusqu'à 10^{23} joules émis en quelques minutes, c'est-à-dire l'équivalent de la production de 30 millions de centrales électriques de 1 000 mégawatts chacune fonctionnant pendant cent ans. Cette expulsion s'accompagne de rayonnement intense, aussi bien dans les domaines ultraviolet et X que dans les ondes radios, et souvent d'émission de particules de haute énergie³⁰ – jusqu'à 1 gigaélectronvolt³¹ – qui peuvent quitter le Soleil. C'est le second processus – au caractère fondamentalement sporadique – d'échange de particules entre la surface du Soleil et son atmosphère puis entre le Soleil et l'atmosphère terrestre. Ce phénomène semble se produire plus souvent lorsque le filament a une forme de S, ou de S inversé. Cette constatation, qui n'est pour l'heure en aucun cas une preuve, est une piste certaine pour la prévision des éruptions solaires. La figure 1.29 montre une telle éruption.

Il existe une seconde classe de protubérances, indépendamment de la présence de taches, au-dessus du Soleil dit "calme". On les appelle des protubérances "quiescentes". Elles peuvent atteindre une altitude de 100 000 kilomètres (soit 0,15% du

30 Les anglo-saxons distinguent les éruptions qui semblent éjecter principalement du rayonnement ("flares") de celles qui emportent l'énergie sous forme de matière ("eruption"). Le français scientifique reste pour l'heure beaucoup plus prudent, et le terme d'éruption s'applique aux deux. Il est possible cependant qu'il s'agisse de phénomènes différents.

31 L'électronvolt est l'énergie communiquée à un électron qui franchit une différence de potentiel de 1 volt. Cette énergie vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule dans le Système International. 1 gigaélectronvolt vaut donc $1,6 \times 10^{-10}$ joule.

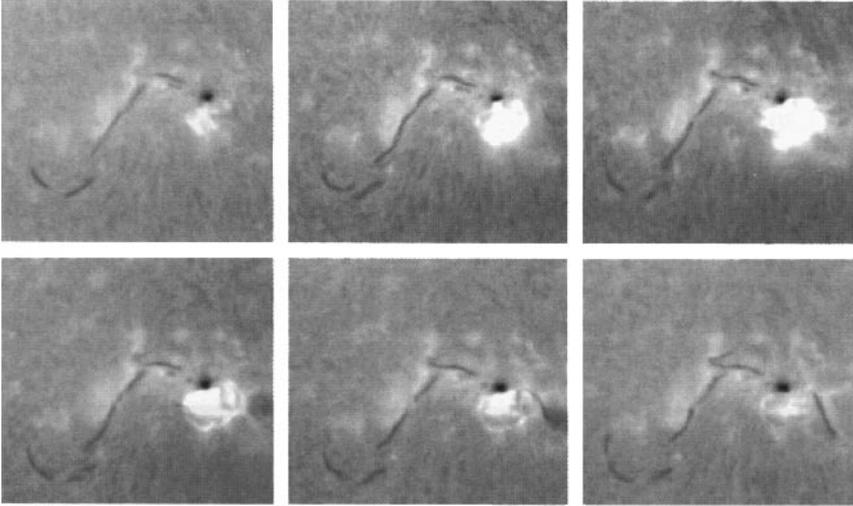


Figure 1.29 - Sur cette figure, une éruption solaire se propage à proximité et au-dessus d'une tache solaire

On distingue le filament en forme de S, qui ne disparaît pas à mesure que se développe l'éruption. Il s'est écoulé un peu plus de 4 heures entre le début du phénomène, en haut à gauche, et la fin, en bas à droite (crédit Hiraiso Solar Terrestrial Research Center, Japon).



Figure 1.30 - Photographie de la chromosphère, prise le 9 août 1973 par le télescope ultraviolet à bord de Skylab (raie de l'hélium ionisé une fois HeII à 30,4 nanomètres)

La protubérance qui s'éclate en éruption mesure environ 34 fois le diamètre de la Terre (crédit NASA).

rayon solaire), et leur champ magnétique est de l'ordre de la dizaine de gauss. Les plus volumineuses d'entre elles ont une masse qui représente jusqu'au cinquième de la masse coronale. Elles peuvent elles aussi se résoudre en une éruption, telle celle de la figure 1.30, et envoyer leur matière dans l'espace.

Les éruptions sont des phénomènes mettant en jeu des énergies considérables. La température dans les grandes éruptions peut atteindre 25 millions de degrés. A cette température, le fer est ionisé 25 fois.

Les éruptions peuvent parfois générer des ondes sismiques qui se propagent sur une très large partie du Soleil. Les figures 1.31 et 1.32 illustrent ces phénomènes de notre étoile dans une période que l'on peut encore considérer comme "calme" !

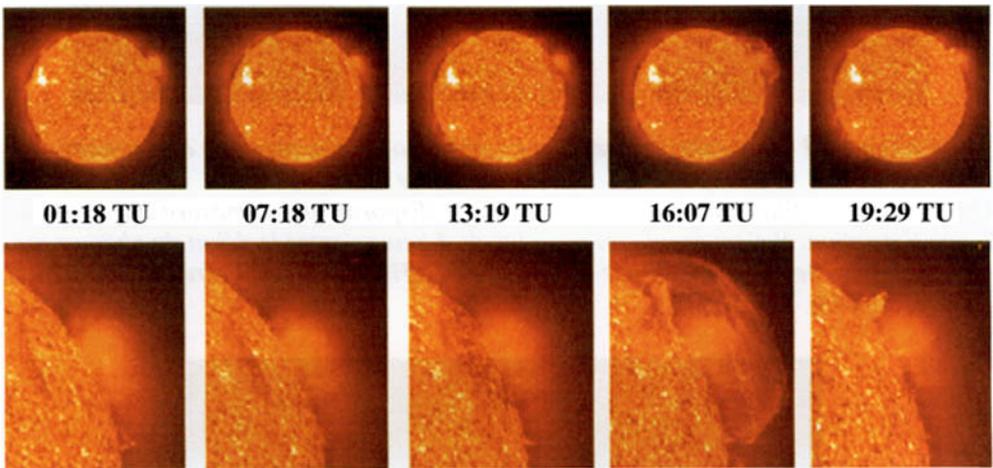


Figure 1.31 - Voici une spectaculaire séquence d'images, prise par SOHO-EIT le 27 août 1997, montrant une belle éruption solaire

Elle est prise à 30,4 nanomètres, correspondant à une température de 60 000 à 80 000 degrés, ce qui est bien plus froid que l'environnement, porté lui à 1 million de degrés. Sur la quatrième image, à 16 heures 7 minutes en temps universel, la protubérance est large d'environ 28 fois le diamètre de la Terre (crédit SOHO/EIT consortium).

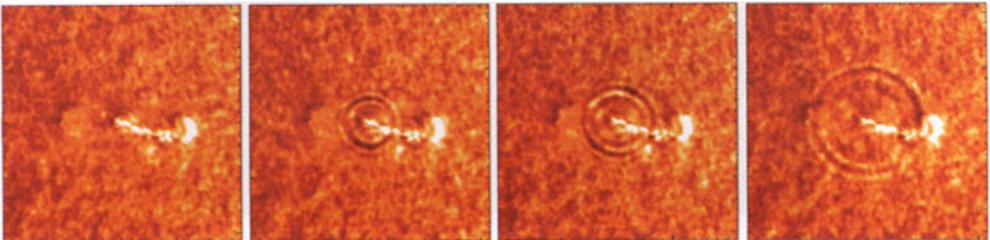


Figure 1.32 - Onde sismique à la surface du Soleil, le 9 juillet 1996, associée à une éruption solaire et probablement à une éjection de masse coronale
En l'intervalle d'une heure, l'onde s'éloigne de l'éruption sur une distance supérieure à dix rayons terrestres (crédit SOHO/MDI).

7.2. TROUS CORONAUX. VENT RAPIDE

Nous avons exploré l'atmosphère solaire en partant de la surface du Soleil, sa photosphère. Rappelons (voir figure 1.16) que vers 3 000 kilomètres d'altitude, et en l'espace de quelques dizaines de kilomètres, la température est passée brutalement de 10 000 degrés à 100 000 degrés, puis bientôt à plusieurs millions de degrés. Cette zone de chauffage intense s'appelle la zone de transition. Quelles structures se distinguent au-dessus ? L'observation aux rayons X du Soleil montre presque systématiquement de larges plages peu lumineuses. Ce sont des structures très mobiles, peu denses, plus froides que la couronne (1 à 2 millions de degrés), qui peuvent couvrir jusqu'à un tiers du Soleil. On les appelle des *trous coronaux*. Les principaux sont souvent localisés aux pôles, et leur champ magnétique est très largement ouvert vers l'espace, constituant une porte de sortie du vent solaire. Ils sont plus étendus lors des périodes calmes du Soleil, et se rétractent quand le Soleil est actif. La physique des trous coronaux est encore mal comprise.

Depuis les trous coronaux se détachent de grandes langues de matière appelées *plumes*, de taille bien supérieure à celle des spicules : quelques dizaines de milliers de kilomètres contre quelques milliers, dont la température est de l'ordre de 1 million de degrés, soit

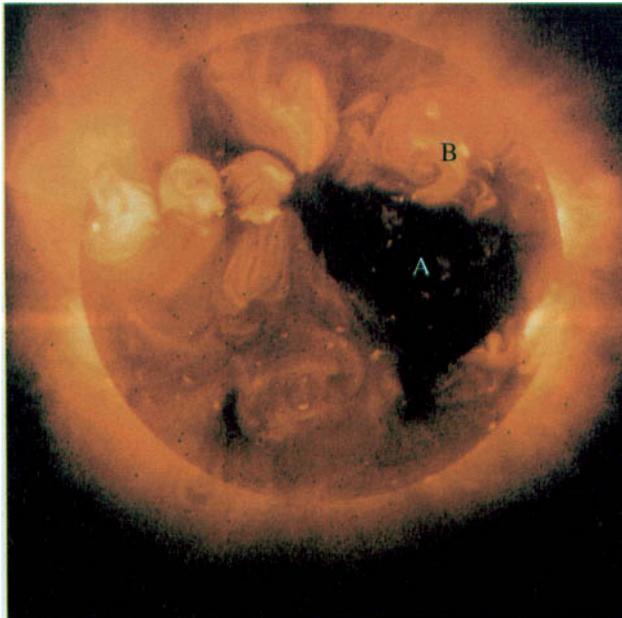


Figure 1.33 - Le Soleil photographié par le satellite YOHKOH en rayons X, le 5 décembre 1999

Apparaissent nettement le trou coronal (A) et la dynamique solaire. L'une des difficultés de la comparaison des images consiste à se souvenir qu'on ne regarde pas au même étage du Soleil selon les longueurs d'onde. On distingue également des boucles coronales (par exemple en B) traçant le champ magnétique local (crédit Japanese Institute of Space and Astronautical Science (ISAS/LPARL) ; NASA).

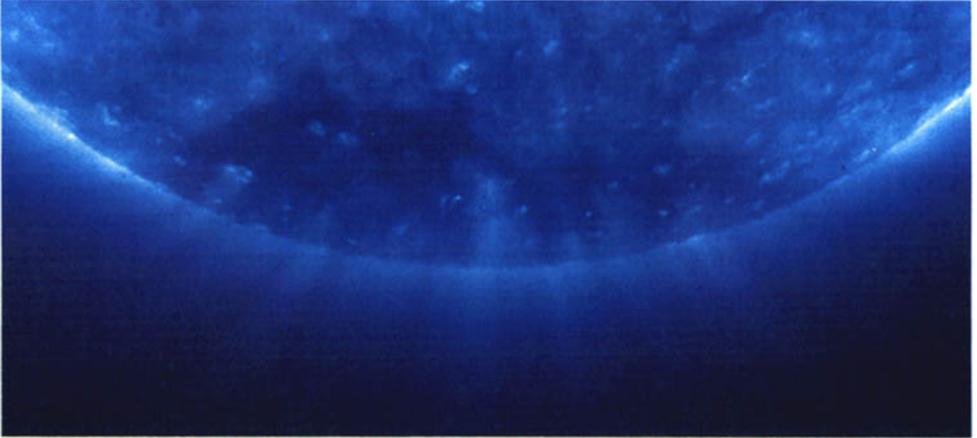


Figure 1.34 - Cette photographie est prise à 17,1 nanomètres, rayonnement émis par le fer ionisé huit ou neuf fois
Dans cette longueur d'onde, on distingue (ici en fausses couleurs) une zone plus sombre au pôle, qui est un "trou coronal". Les plumes sont les grandes mèches de matière au-dessus de ce trou coronal (crédit EIT à bord de SOHO).

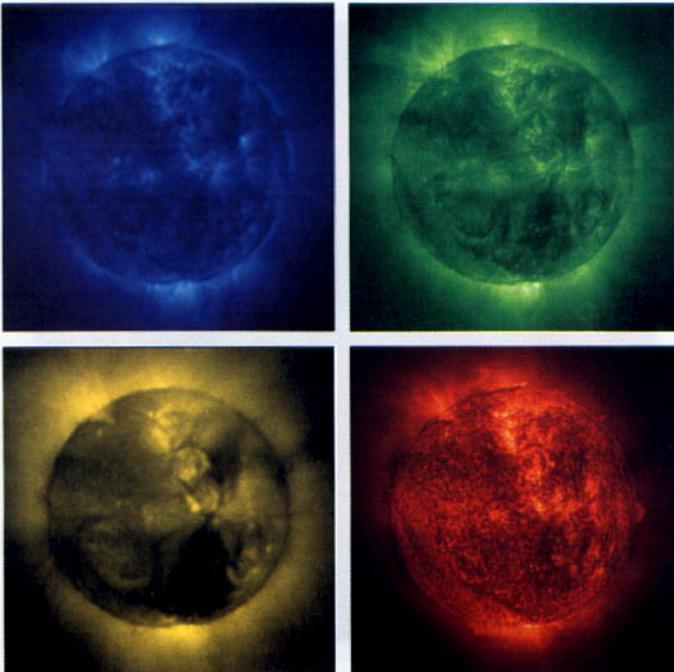


Figure 1.35 - Le 6 décembre 1991, EIT prend quatre images du Soleil, à 17,1 nanomètres (en haut à gauche), à 19,5 nanomètres (en haut à droite), à 28,4 nanomètres (en bas à gauche) et à 30,4 nanomètres (en bas à droite)
Des boucles coronales sont visibles sur toutes les images, ce qui montre qu'elles se manifestent à diverses altitudes au-dessus de la chromosphère. Les trous coronaux sont bien visibles sur l'image du fer ionisé quatorze fois à 28,4 nanomètres.

dix fois plus élevée que celle des spicules. Leur origine est encore mal connue. Le vent qui s'en détache va presque deux fois plus vite que le vent solaire issu des spicules. Il est appelé *vent rapide*. C'est lui qui a été mesuré par la sonde ULYSSES au-dessus de 20 degrés de latitude. Il est le plus souvent émis à des latitudes plus élevées, mais la force de Coriolis³² tend à le ramener vers l'équateur solaire, c'est-à-dire vers le plan de l'écliptique³³.

Lorsque les trous coronaux se développent vers les basses latitudes, du vent à 700 kilomètres par seconde se mélange à du vent à 400 kilomètres par seconde. Il le bouscule, dans la mesure du faible nombre de collisions permises, s'y frotte et s'y ralentit, accélère l'autre. Des perturbations s'y créent, et le bel ordonnancement du vent solaire éclate. Le champ magnétique lui aussi se met à varier, au gré de la vitesse et de la direction des particules. Au niveau de la Terre, tout devient possible : des inversions du champ magnétique solaire : le "nord" passe brutalement au "sud", puis revient au "nord" en l'espace de quelques dizaines de minutes... Des bouffées de particules chaudes, rapides, sont suivies brutalement de souffles plus lents... Elles vont bien sûr avoir des conséquences nombreuses si elles heurtent la Terre.

7.3. STRUCTURE À GRANDE ÉCHELLE : JETS CORONAUX

Abordons à présent les grandes échelles concernant l'activité solaire, avec des phénomènes de plus de deux rayons solaires au-dessus de la photosphère.

Lors d'éclipses, ou avec un coronographe³⁴, des structures en forme de jets apparaissent en lumière blanche. L'analyse de leur champ magnétique montre qu'à leur base, les lignes de champ sont fermées, et ouvertes au-dessus d'un rayon solaire environ. A l'interface entre le domaine fermé et le domaine ouvert, une couche neutre séparerait des régions dont les champs magnétiques seraient orientés dans des directions opposées. A titre d'exemple, nous avons illustré ce modèle sur l'un des jets de la figure 1.36-a agrandi sur la figure 1.36-b.

Souvent en période de faible activité solaire, seulement deux jets sont visibles de part et d'autre du Soleil. Dans ce cas, il semble qu'ils soient alignés le long d'une ligne qui possède une polarité au nord, et la polarité inverse au sud, et constitue donc une ligne d'inversion du champ magnétique coronal. Mais cette ligne d'inversion n'est pas nécessairement alignée le long de l'équateur solaire, si bien que la Terre, au cours des 27 jours de rotation solaire, se trouve tantôt exposée à un champ magnétique orienté vers le sud, et tantôt vers le nord. Mais lorsque le Soleil est dans une phase

32 Voir en annexe 11 des rappels sur la force de Coriolis.

33 Plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil.

34 Un coronographe simule une éclipse : un disque occulteur est placé au centre du télescope, de façon à supprimer la lumière directe intense de la photosphère et voir les détails diffus et peu lumineux de la couronne.

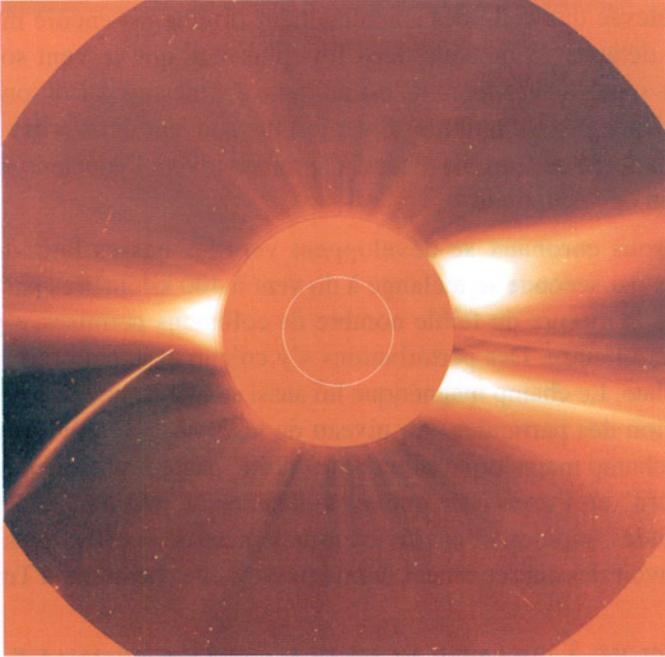


Figure 1.36-a - Sur cette photographie, le Soleil est occulté par un coronographe. Pour éviter tout aveuglement de l'instrument, l'occulteur a une taille bien supérieure à la taille apparente du Soleil, qui est figurée par un cercle jaune. On distingue dans la couronne trois jets coronaux particulièrement brillants. A gauche, on voit également la trace d'une comète qui se dirige vers le Soleil (crédit LASCO-SOHO).



Figure 1.36-b - Illustration du modèle de jets. Les lignes représentent les lignes de champ magnétique, et les flèches la direction de ce champ.

active, la structure magnétique de la couronne se complexifie. La photographie 1.28 montre un exemple à plusieurs jets, encore bien distincts. En pleine activité, la structure magnétique devient si perturbée que les jets se produisent dans toutes les directions. La couronne prend alors une apparence sphérique, comme illustré par la figure 1.37, et la Terre est soumise à un régime plus compliqué d'inversions du champ magnétique interplanétaire.



Figure 1.37 - Couronne solaire prise lors de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999
(crédit P., N. et J.F. Mein, DASOP, Observatoire de Paris-Meudon)

7.4. LES ÉJECTIONS DE MASSE CORONALE

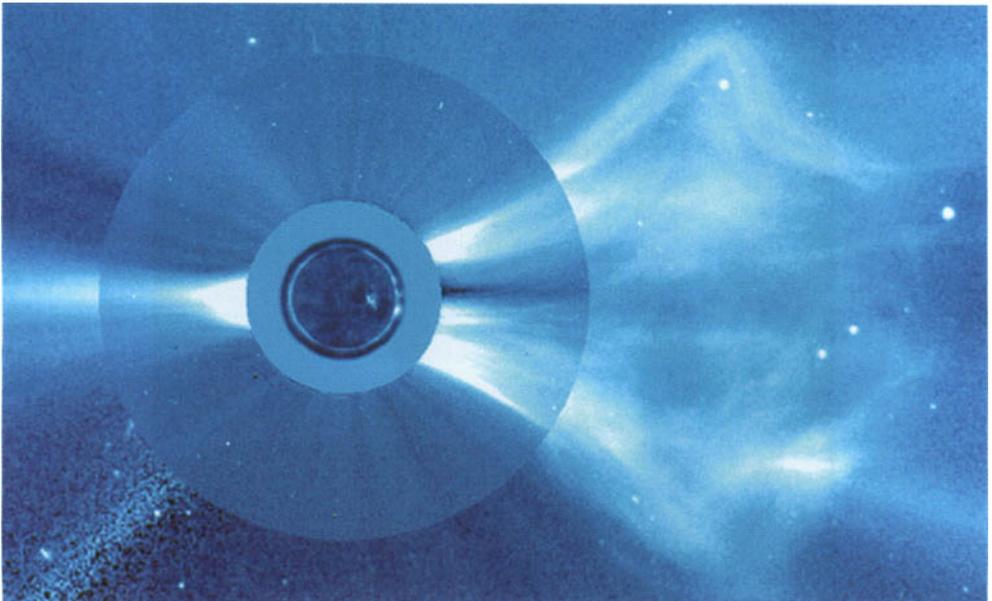
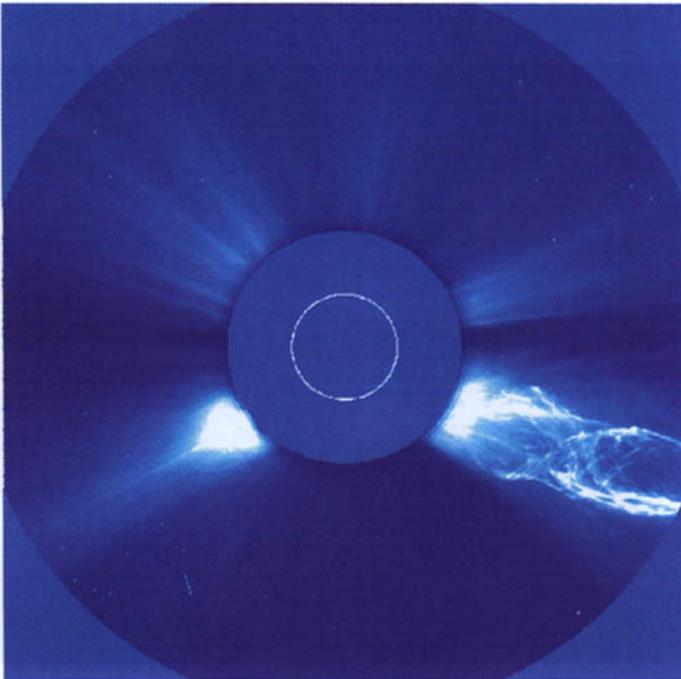


Figure 1.38 - A droite de l'image, une éjection de masse coronale
Ce montage, réalisé à partir des données de plusieurs instruments à bord de SOHO, montre également le Soleil au centre en bleu sombre. Les points blancs sont des étoiles. La structure magnétique de la couronne est bien visible au-dessus des trous coronaux (crédit LASCO/SOHO).

Ce sont certainement les phénomènes solaires les plus importants du point de vue de la météorologie de l'espace. Leur découverte est très récente, et a été rendue possible à partir de 1973, grâce à des coronographes embarqués dans l'espace. Les éjections de masse coronale sont des changements observables de la structure coronale, qui durent de quelques minutes à quelques heures, apparaissent brillantes en lumière visible dans la couronne, et surtout, impliquent une expulsion de plasma et de champ magnétique de la couronne vers l'espace interplanétaire. Leur échelle dépasse de loin celle des éruptions : une éjection de masse coronale peut affecter plus du tiers de la couronne, à des altitudes de plusieurs rayons solaires. Jusqu'en 1979, on croyait que les éruptions engendraient les éjections. Il n'en est rien : les deux phénomènes sont observés tantôt indépendamment, tantôt en conjonction, sans que l'un précède systématiquement l'autre. Leur structure elle aussi résiste à l'analyse, et leur explosion n'est pas expliquée. Pour donner une comparaison de l'échelle de ces phénomènes, on peut imaginer une tornade de 5 000 kilomètres de diamètre qui ravagerait l'Europe en quelques minutes, générant sur l'ensemble de notre planète des vents assez puissants pour détruire toute habitation, et ce plusieurs fois par jour. Leur occurrence, sur le Soleil, varie en effet de une demie à trois fois par jour terrestre, selon qu'on est en période de faible ou forte activité solaire. Les éjections de masse



**Figure 1.39 - A droite de l'image, une éjection de masse coronale
(ce jour-là associée à une éruption solaire)**

On peut comparer sa taille à celui du jet à gauche. Les trous coronaires sont les parties plus sombres de l'atmosphère solaire. Le cercle blanc figure la taille du Soleil (crédit LASCO/SOHO).

coronale existent à toutes périodes du cycle. On pense avoir constaté qu’au minimum du cycle d’activité solaire, elles apparaissent plutôt vers l’équateur, puis sur des gammes de latitudes de plus en plus grandes, pour arriver jusqu’à $\pm 60^\circ$.

Si leur nombre varie en fonction de l’activité, leur distribution est différente de celle des taches solaires : on ne peut donc pas simplement lier les deux phénomènes, pas plus qu’on ne peut lier éruptions et éjections de masse coronale.

Si le vent solaire fait perdre 10^{14} kilogrammes de masse au Soleil par jour, les éjections n’en extraient “que” 10^{12} kilogrammes. La distribution de vitesse des particules éjectées est très variable, allant de 100 à 2 000 km s^{-1} , avec une moyenne qui se situe à environ 300 km s^{-1} .

Au moment de l’éruption, la matière perdue crée localement une déplétion, un trou coronal provisoire, dont le prompt comblement engendre des mouvements de matière sous forme d’ondes³⁵ qui se propagent dans l’ensemble de la couronne.

L’origine des éjections de masse coronale est un mystère. Elles emportent avec elles le champ magnétique solaire local, avec des composantes dans toutes les directions. On a constaté au cours des deux cycles d’observations que nous possédons, que le champ est plutôt orienté vers le sud en début et vers le nord en fin, sans qu’on puisse



Figure 1.40 - Spectaculaire éjection de masse coronale vue par le coronographe LASCO à bord de SOHO
La taille du Soleil est figurée par un cercle blanc.

35 Appelées “ondes de Moreton”, du nom de leur premier observateur en 1961. Leur relation avec les ondes sismiques de la figure 1.32 n’est pas encore évidente, bien que supposée par plusieurs scientifiques.

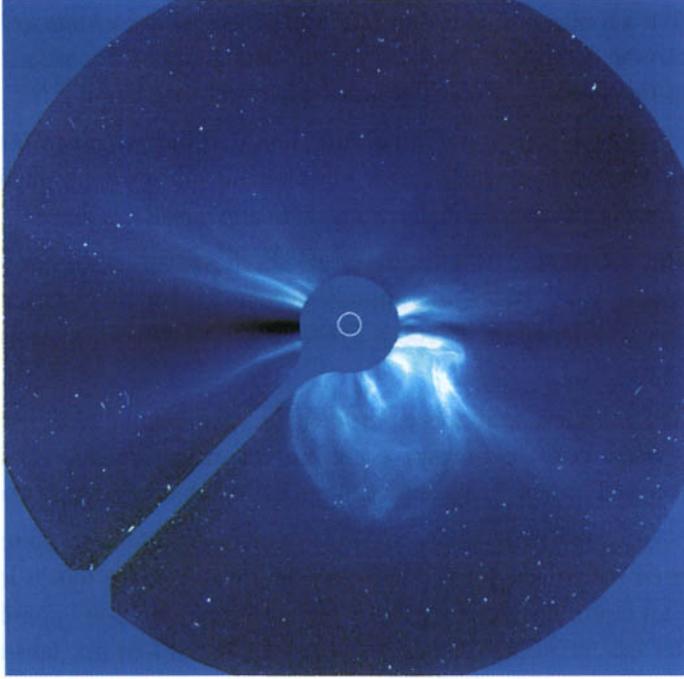


Figure 1.41 - Ejection de masse coronale, le 29 mars 1998
Le trait à gauche est la potence du coronographe.
La taille du Soleil est figurée par un cercle blanc.

cependant en tirer une loi (deux cycles ne suffisent pas). Le front de l'éjection, une fois dans l'espace, a reçu le nom de nuage magnétique, et il est important de prévoir lesquels affecteront la Terre.

Or, s'il est maintenant possible de voir en émission les éjections se produisant sur les côtés du Soleil, les éjections venant vers nous, peu lumineuses, restent invisibles, cachées par la lumière intense du disque solaire. On ne peut les deviner qu'à leurs effets : recomposition de la couronne et, pour les éjections de plus grande échelle, un halo qui encadre tout le Soleil. Mais ces éjections halos ne viendront pas toutes heurter notre planète. Certaines partent même dans la direction diamétralement opposée, trouvant leur origine sur la face cachée du Soleil.

Comme dans le cas des éruptions solaires, mais avec une distribution des vitesses très différente et une échelle bien supérieure, les éjections de masse coronale perturbent évidemment le vent solaire.

7.5. UN INDICE DE L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Comme on l'a vu, l'activité solaire se manifeste par de nombreux phénomènes, souvent difficiles à quantifier voire, dans le cas de l'extrême ultraviolet, à mesurer. Or, il est important de chiffrer le taux d'activité de notre étoile. Le nombre de taches

ne suffit pas : il ne représente pas, par exemple, les éruptions ou les éjections de masse coronale. On est alors conduit à chercher un autre indicateur de l'activité, ou en langage moderne, un "proxy". En déterminer un n'est pas aisé ! Que doit-il en effet caractériser ? Le nombre de taches, le nombre de filaments et de protubérances, le nombre d'éjections de masse coronale à un instant donné ? ...

Pour ce qui concerne l'objet de ce livre, il faut un indicateur de l'activité solaire au sens le plus large. On pense au rayonnement solaire dans la gamme radio (avec des longueurs d'ondes de l'ordre du centimètre). Celui-ci, en effet, dépend à la fois de la température du lieu d'émission et de sa concentration électronique, toutes deux variant avec l'activité. De surcroît, il a l'avantage important de pouvoir être mesuré depuis le sol de la Terre.

Le choix de la longueur d'onde internationalement adoptée – 10,7 cm – a été largement conditionné par le développement des techniques pendant la seconde guerre mondiale. Son intensité est appelée le *flux à 10,7 cm* ou encore *indice décimétrique*, notée $f_{10.7}$ et exprimée en $10^{22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$, unité appelée *unité de flux solaire* et parfois *Jansky*³⁶. Elle va de quelques dizaines à environ 350. L'intensité du flux à 10,7 cm est mesurée régulièrement depuis 1947, mais ce n'est que bien plus tard, en 1964 qu'il fut montré qu'elle est un excellent témoin de l'activité solaire globale. Cependant, d'autres longueurs d'onde auraient pu être sélectionnées avec un égal bonheur.

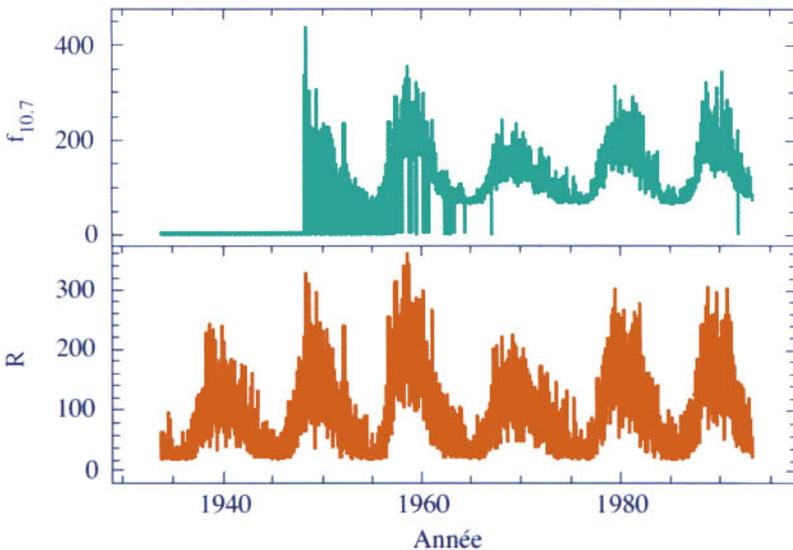


Figure 1.42 - Cette figure reprend l'évolution du nombre de taches solaires (voir figure 1.23), sur laquelle est ajoutée la variation de l'indice décimétrique $f_{10.7}$, qui constitue, comme on le voit, un bon indicateur de l'activité solaire

³⁶ On constate que cette unité est celle de l'éclairement spectrique en Système International divisé par 10^{22} (voir en annexe 6 les grandeurs photométriques).

Faute de mieux, tous les modèles géophysiques actuels utilisent $f_{10.7}$ comme indicateur de l'activité solaire. Mais un important travail de recherche est en cours pour en trouver un plus fin, plus précis, incluant d'une certaine façon le rayonnement des protubérances.

8. LE SOLEIL : À LA SOURCE DE LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Au cours de ce chapitre a été présenté le Soleil, notre étoile. Il inonde la Terre de rayonnement et de matière qui vont générer des perturbations de diverses natures. Revenons sur quelques données majeures de ce chapitre.

La masse solaire de 2×10^{30} kilogrammes et son diamètre de $1,4 \times 10^9$ mètres n'en font qu'une étoile de taille moyenne. Son cœur, lieu de la fusion nucléaire, est à une température de 15 millions de kelvins. En surface, sur la photosphère, la température n'est plus que de 5 800 kelvins. Le Soleil est composé principalement d'hydrogène à environ 94% et d'hélium à environ 6%. C'est la transformation d'hydrogène en hélium qui crée l'énergie dégagée.

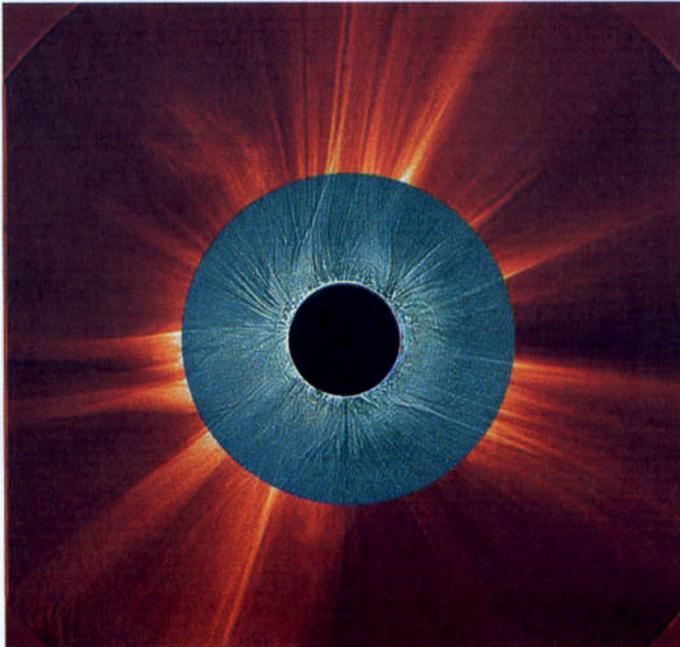


Figure 1.43 - Montage des différentes couches atmosphériques du Soleil, montrant la structure magnétique à diverses échelles, le 11 août 1999, lors de l'éclipse totale (crédit S. Koutchmy, IAP-CNRS, LASCO/SOHO)

Il connaît des périodes d'activité d'environ 11 ans caractérisées par de nombreuses manifestations : inversion du champ magnétique dipolaire, cycle de taches solaires, variation du nombre d'éruptions, du flux électromagnétique, du nombre d'éjections de masse coronale...

Il existe deux sources majeures (sources pour la Terre, pertes pour l'étoile) d'énergie issues du Soleil qui vont présider à la formation de l'environnement ionisé terrestre : les particules et le rayonnement.

Les particules constituent le vent solaire, qu'on peut scinder en un vent lent et un rapide. Ces vents sont permanents et, au niveau de la Terre, possèdent une vitesse variable de 200 à 800 km s⁻¹ et une concentration d'environ dix particules (*cinq ions et cinq électrons*) par mètre cube.

La seconde source permanente est le rayonnement électromagnétique, dans lequel l'extrême ultraviolet joue un rôle particulier.

Il existe une troisième source d'énergie particulaire, qui trouve son origine dans les éruptions ou éjections de masse coronale. Cette source est sporadique et varie avec l'activité magnétique solaire. Les particules ont des vitesses souvent supérieures à celles du vent solaire permanent, qui leur permettent d'atteindre l'orbite de la Terre parfois en seulement une dizaine d'heures. Ces éruptions s'accompagnent également d'une augmentation significative du rayonnement électromagnétique.

Tableau 1.5 - Comparaison des sources d'énergie solaire

	Caractère	Couverture solaire	Effet sensible sur Terre après
Vent solaire lent	Permanent	Tout le Soleil sauf trous coronaux	3 jours
Vent solaire rapide	Permanent	Trous coronaux	2 à 3 jours (mélange avec le vent solaire lent)
Spectre UV	Permanent	Tout le Soleil	8 minutes
Eruptions et éjections de masse coronale	Sporadique	De faible à un tiers du Soleil	quelques heures à 3 jours

La puissance totale émise par le Soleil est de l'ordre de 10²⁷ watts. Sous forme de photons, 1 000 milliards de watts sont émis par mètre carré au niveau de la photosphère, et ce sur l'ensemble de l'étoile, de façon stable. L'ultraviolet ne constitue qu'une faible portion du rayonnement électromagnétique, puisqu'il ne correspond en moyenne qu'à une émission de 100 000 W m⁻² au niveau du Soleil. Il s'agit d'une source hautement variable. Le vent solaire lui-même, rapide et lent confondu, n'emporte "que" 10 000 W m⁻². Il est émis sur la plus grande partie de la sphère.

Le flux d'énergie par unité de surface, porté par les particules lors d'éruptions, peut atteindre le million de watts par mètre carré, tandis que l'émittance du rayonnement peut s'élever jusqu'à 100 milliards de watts par mètre carré.

Du point de vue de l'énergie électromagnétique, la Terre reçoit 1366,1 watts par mètre carré (le Soleil étant au zénith). C'est une valeur moyenne dont on connaît les impacts sur notre vie quotidienne. Mais quelles sont les conséquences des variations d'émissions solaires, aussi bien sous forme de rayonnement que de particules ? Pour les comprendre, le prochain chapitre est consacré à une description de la Terre et de son environnement magnétique et atmosphérique.

Chapitre 2

LA TERRE

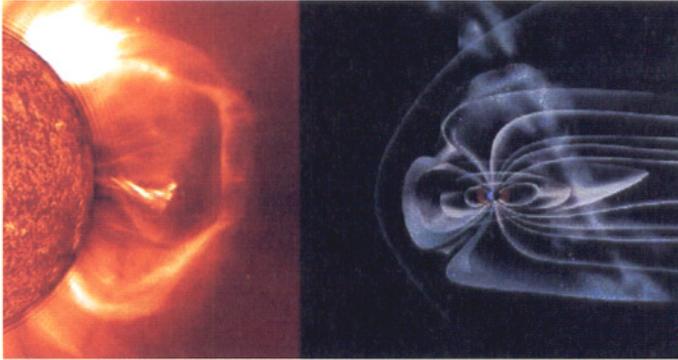


Figure 2.1 - Ce montage montre à gauche un événement solaire éruptif et à droite une représentation d'artiste de la Terre, dans son champ magnétique figuré par les lignes pâles (crédit SOHO pour le Soleil, NASA-NOAA pour la Terre, issu du logo du satellite WIND de la NASA)

Comment la Terre va-t-elle se comporter dans ce vent solaire de particules et sous l'action de ces ondes électromagnétiques ? Quels phénomènes se produisent dans l'environnement terrestre ? Pour répondre à ces questions, il nous faut connaître un peu mieux quelques caractéristiques de notre planète.

1. LA TERRE DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Le Soleil est entouré d'un système de corps de tailles et d'orbites diverses. Les quatre premières ¹ planètes, Mercure, Vénus, la Terre et Mars sont appelées telluriques, en raison de leurs tailles et de leurs compositions proches de celles de la Terre. Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune sont les planètes géantes, gazeuses, et de ce point de vue très différentes des planètes telluriques. Ces huit planètes tournent grossièrement dans le même plan autour du Soleil, le plan de l'écliptique. Enfin, le couple Pluton-Charon

¹ Les planètes sont habituellement classées suivant leur distance moyenne au Soleil, de la plus proche Mercure à la plus lointaine Pluton.

constitue une curiosité du système solaire, avec une orbite très inclinée sur l'écliptique (7,2 degrés) et un diamètre de 2 280 kilomètres pour Pluton, soit deux tiers de celui de la Lune, faisant penser à deux objets capturés par le Soleil plutôt que formés en même temps que le système solaire.

La diversité des situations planétaires est tout à fait remarquable. Dans ses relations avec le Soleil, la présence d'une atmosphère et d'un champ magnétique intrinsèque

Tableau 2.1 - Quelques paramètres des planètes du système solaire

	Révolution autour du Soleil ("période tropicque")	Distance moyenne au Soleil [millions de km /UA ²]	Diamètre à l'équateur [km]	Masse (T = 1)	Volume (T = 1)	Rotation sur soi-même (jour)	Gravité (T = 1)
Mercure	88 jours	57,9 / 0,387	4 880	0,055	0,06	58,65	0,38
Vénus	224,7 jours	108,1 / 0,723	12 100	0,815	0,86	243*	0,9
Terre	365,26 jours	149,6 / 1	12 756	1	1	1	1
Mars	1 an et 321 jours	227,8 / 1,524	6 800	0,107	0,15	1,026	0,38
Jupiter	11 ans et 314 jours	778,3 / 5,203	142 800	317,8	1,323	0,41	2,53
Saturne	29 ans et 167 jours	1 427 / 9,539	120 800	95,181	752	0,427	1,07
Uranus	84 ans et 7 jours	2 869 / 19,18	47 600	14,531	64	0,45*	0,92
Neptune	164 ans et 280 jours	4 497 / 30,06	44 600	17,135	54	0,67	1,19
Pluton	251 ans et 314 jours	5 900 / 39,44	5 850	0,0022	0,01	6,39	0,05

*Vénus et Uranus tournent dans le sens rétrograde, c'est-à-dire dans le sens inverse de la Terre (T).

- 2 L'unité adoptée habituellement pour les distances dans le système solaire est l'Unité Astronomique (UA), qui correspond à la longueur moyenne du demi-grand axe de l'orbite terrestre, soit 149 597 870 kilomètres. Entre le début et le milieu de l'année, la distance de la Terre au Soleil passe de 147 à 152 millions de kilomètres. La première valeur, point de l'orbite d'une planète ou d'une comète le plus proche du Soleil, s'appelle le périhélie, et la seconde, point le plus éloigné, l'aphélie. Le mouvement des planètes autour du Soleil est bien décrit en première approximation par les lois de Kepler que le lecteur pourra découvrir en annexe 12.

sur la Terre ne sont pas sans conséquence. Ce cas est unique parmi les planètes telluriques, qui possèdent soit l'une, soit l'autre de ces caractéristiques. Les planètes géantes sont magnétisées elles aussi, mais contrairement à la Terre, leur atmosphère n'a pas de discontinuité avec la planète elle-même : du cœur vers l'espace le gaz dont elles sont constituées passe graduellement d'un état compact appelé "métallique" à un état gazeux plus proche de ce que nous connaissons aux pressions qui règnent sur la Terre.

D'autres corps font partie du système solaire : astéroïdes et comètes, dont les tailles, les compositions et les orbites sont variables. Des astéroïdes, fragment de roche, circulent par milliers, en particulier dans une ceinture entre Mars et Jupiter. Les comètes sont des corps de glace et de poussière.

Troisième planète en partant du Soleil, la Terre possède un axe de rotation sur elle-même incliné de $23^{\circ}27'$ sur le plan de l'écliptique. Cette inclinaison se traduit par le phénomène des saisons et définit les latitudes des deux tropiques qui sont celles sur lesquelles le Soleil arrive à la verticale à midi aux solstices de Juin (Cancer) et de Décembre (Capricorne).

Nous venons de parler de "latitude". Il est sans doute nécessaire de parler de repérage et d'heure.

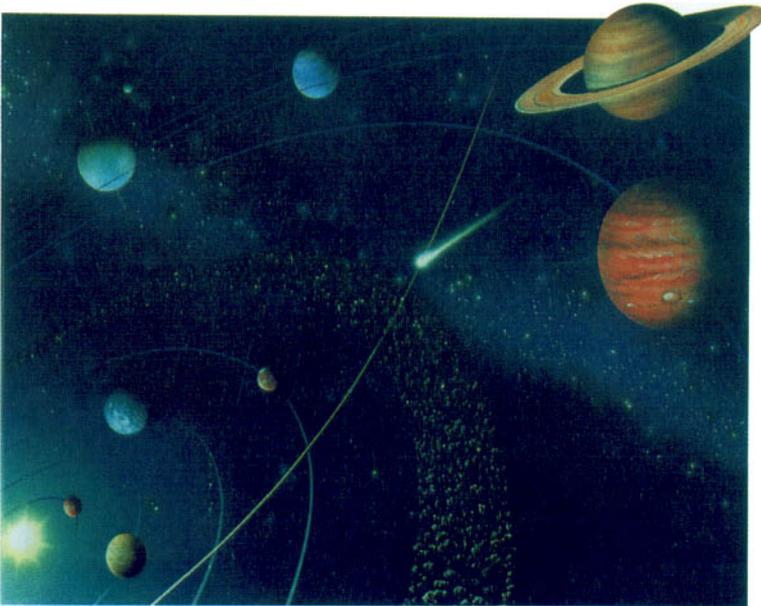


Figure 2.2 - Représentation d'artiste du système solaire

Les échelles de distance ne correspondent pas aux échelles de volume (voir tableau 2.1). Depuis le Soleil, on distingue sur ce dessin Mercure, Vénus, la Terre puis Mars. Au-delà, une ceinture d'astéroïdes et une comète, dont la trajectoire est figurée par un trait continu, mais dont la queue est en opposition au Soleil. Viennent ensuite les planètes géantes, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Enfin (en haut à gauche de l'image), Pluton (crédit Editions du Sorbier, tous droits réservés).

Les coordonnées géographiques terrestres font appel à un système de lignes imaginaires (figure 2.3). Celles qui joignent les deux pôles géographiques s'appellent les méridiens. Les lignes perpendiculaires aux méridiens sont les parallèles. Par convention, le méridien qui passe par la ville de Greenwich, en Grande-Bretagne, est le méridien origine. La longitude d'un point P (positive vers l'est, négative vers l'ouest) est

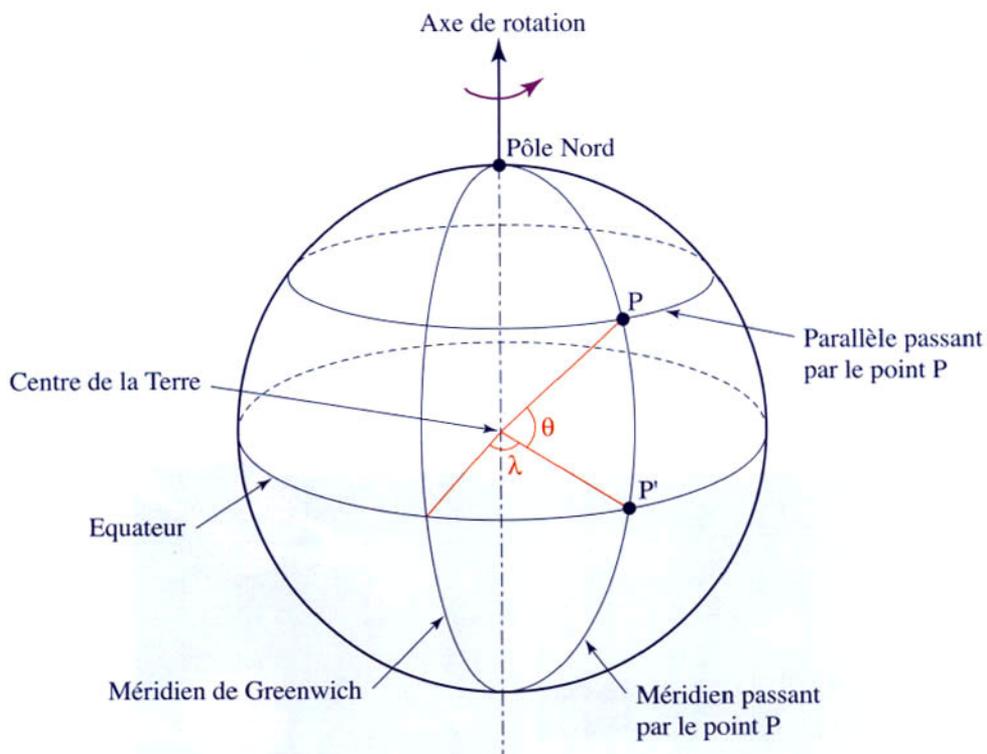


Figure 2.3 - Les coordonnées géographiques

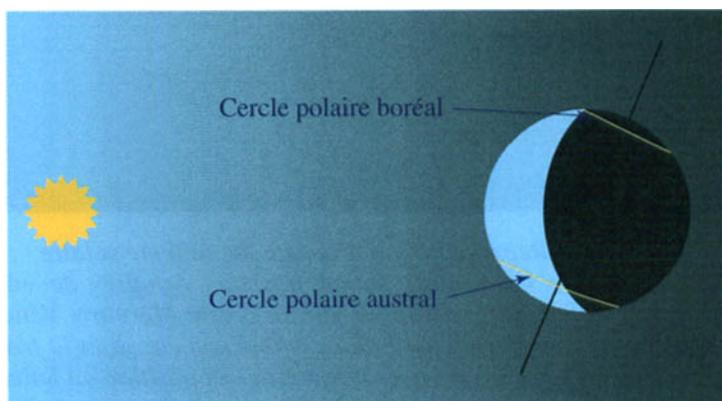


Figure 2.4 - Les cercles polaires pendant l'hiver boréal

l'angle λ compté sur un même parallèle entre une droite qui relie le centre de la Terre au méridien de Greenwich et une droite qui relie le centre de la Terre et le méridien qui passe par le point P. Elle est généralement exprimée en degrés. Par exemple, la longitude de Paris est $2^{\circ}20'14''$.

Le parallèle qui passe à égale distance des deux pôles géographiques est l'équateur géographique. Considérons un point P dont le méridien coupe l'équateur en P'. La latitude du point P est l'angle θ que fait la droite qui passe par le centre de la Terre et P' avec la droite qui passe par le centre de la Terre et P. Elle est positive vers le nord et négative vers le sud. On l'exprime généralement en degrés.

Les systèmes de comptage du temps peuvent être relativement compliqués (voir annexe 13), mais pour aborder la météorologie de l'espace, il suffit d'introduire trois unités intuitives de l'heure. La première est tout simplement l'heure du lieu où l'on se trouve par rapport au Soleil. On l'appelle l'heure locale, ou temps local (qu'on note TL en abrégé) : lorsque le Soleil est au zénith, il est simplement midi en heure locale. Cependant, l'internationalisation des échanges a conduit à introduire dès le dix-neuvième siècle une heure commune à tous les pays, l'heure universelle (notée TU pour Temps Universel) qui prend comme référence le méridien de Greenwich. Quel que soit le lieu de la Terre, l'heure universelle est identique, celle de ce méridien. La dernière heure est l'heure légale que chaque pays se choisit. La France, avec ses 1 000 kilomètres de large, n'a pas une heure locale identique en chaque point du pays : le Soleil se lève sur l'Alsace près d'une heure avant de se lever sur Brest. Il est raisonnable cependant d'avoir à l'intérieur du pays une heure commune. C'est l'heure légale. Comme celle-ci n'a pas de raison d'être très en phase avec l'heure locale, des considérations politiques ou économiques peuvent imposer des décalages plus ou moins grands : l'heure légale française avance d'une heure sur l'heure locale du méridien de Greenwich en hiver, de deux en été.

En raison de l'inclinaison de la Terre, il existe deux régions, l'une au nord et l'autre au sud, telles que le Soleil ne s'y lève pas au moins une journée par an, ou ne s'y couche pas au moins une journée par an. La limite de ces régions, à $66^{\circ}33'$ de latitude, s'appelle les cercles polaires (arctique ou boréal au nord, antarctique ou austral au sud).

2. STRUCTURE INTERNE DE LA TERRE : LE CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE

En première approximation, la Terre peut être assimilée à l'empilement de sphères de caractéristiques propres. Au plus profond, elle possède un noyau interne (ou graine) composé de nickel et de fer. Entre $-6\,370$ kilomètres et $-5\,150$ kilomètres (c'est-à-dire en partant du centre de la Terre jusqu'à une distance au centre de $1\,220$ kilomètres), le noyau est probablement solide. Sa température est de l'ordre de $5\,000$ kelvins, ce

qui rend impossible l'aimantation intrinsèque du milieu, étant au-dessus de la température de Curie³ du fer, qui est de 1 043 kelvins.

Au-delà, jusqu'à - 2 900 kilomètres, le fer devient liquide : c'est le noyau externe. Le fer et le nickel continuent à être les composés majoritaires, mais ils sont sans doute associés à d'autres éléments plus légers, tels l'oxygène, le soufre, le silicium ou le carbone. La température diminue de la bordure interne du noyau liquide jusqu'à sa bordure externe, de 4 800 kelvins environ à 3 100 kelvins. Nous sommes dans un milieu particulier, un métal liquide et conducteur dont les propriétés sont à bien des égards comparables à celles d'un plasma. Parmi ces propriétés, citons notamment la grande mobilité des électrons. Peu à peu, une partie du fer du noyau liquide cristallise et se dépose sur la graine solide. Le noyau liquide se trouve, en raison de la perte progressive de son fer, proportionnellement enrichi en éléments légers, soufre et oxygène, surtout dans ses basses couches, celles proches de la graine solide. La cristallisation est exothermique : elle libère de la chaleur qui alimente le noyau liquide. Cette énergie est consommée en partie par des mouvements de convection : le métal liquide proche de la graine devient moins dense et plus chaud. Il s'élève vers la bordure externe du noyau liquide, vers le manteau de la Terre. En s'élevant, il est soumis à une gravité qui décroît, et à des forces centrifuges dues à la rotation de la Terre sur elle-même qui croissent. Il se produit un mouvement d'ensemble du noyau liquide comparable à celui d'une lente rivière spiralant sur elle-même. Du mouvement de rotation des charges naît le champ magnétique dipolaire terrestre.

D'autres mouvements peuvent détruire la structure dipolaire du champ, en créant localement des anomalies mesurables à la surface de notre planète. On a acquis la conviction que la graine liquide est active, turbulente. En outre, l'aimantation des matériaux des couches superficielles de la planète est une seconde source d'anomalies magnétiques mesurables depuis la surface qui, à l'inverse des premières, n'évoluent pas dans le temps. La troisième source d'anomalie est abondamment décrite par la suite, puisqu'elle est en relation directe avec le vent solaire.

Lorsque la spirale de la "rivière de plasma" du noyau terrestre est trop resserrée, elle se déroule en se retournant. Le champ magnétique terrestre s'inverse alors. Au cours des derniers 4,5 millions d'années, l'inversion du champ a eu lieu 25 fois, à des intervalles de temps qui ne montrent aucune régularité.

3 Dans un champ magnétique \vec{B} , un matériau magnétique acquiert une aimantation \vec{M} (en $A\ m^{-1}$) proportionnelle à \vec{B} s'il est paramagnétique. Le facteur de proportionnalité est approximativement le rapport entre la susceptibilité magnétique χ_m , qui caractérise le matériau, et la perméabilité relative μ_p , qui caractérise le milieu dans lequel se propage le champ. Les milieux ferromagnétiques, tels le fer, le cobalt, le nickel, sont tels que leur susceptibilité magnétique est positive et leur perméabilité très grande devant 1. Si leur température est inférieure à un seuil appelé la température de Curie, ils ont une aimantation permanente qui disparaît au-dessus. Pour le fer, la température de Curie vaut 1 043 kelvins.

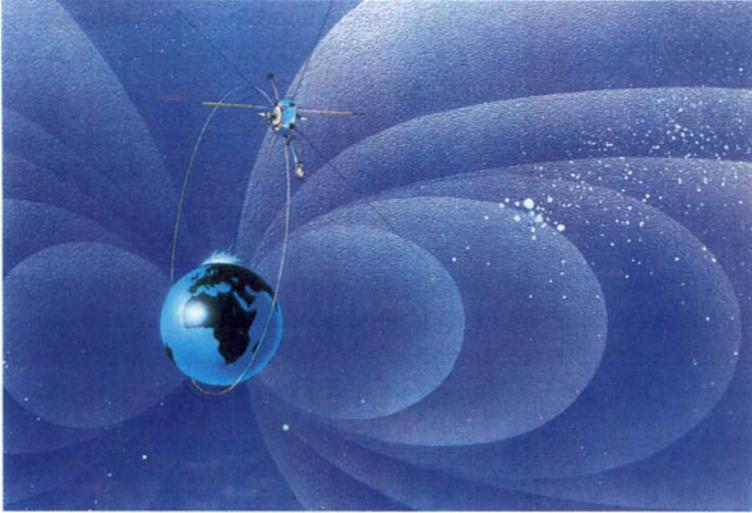


Figure 2.5 - Vue d'artiste des lignes de champ magnétique autour de la Terre
Le satellite suédois, Viking, avait pour mission l'observation de l'environnement de la Terre. Il a été lancé en février 1986 (crédit Viking, Agence suédoise de l'Espace).

Selon certaines théories, la rivière de plasma crée un champ magnétique qui à son tour influence les charges environnantes et les force ainsi à tourner et à alimenter le champ. Tout se passe comme si, une fois le champ magnétique mis en place, il trouvait en lui-même les ressources pour perdurer. Cependant, cette théorie ne permet pas de répondre à la question essentielle de l'origine du champ magnétique planétaire. D'autres théories prennent en compte un couplage du noyau liquide avec le manteau solide de la Terre, et en particulier le rôle que pourraient jouer les volcans. Malheureusement à l'heure actuelle, aucune théorie n'est en mesure d'expliquer à la fois la mise en place d'un champ magnétique à l'échelle planétaire, ses retournements irréguliers, l'allure des irrégularités du champ et ses fluctuations rapides.

Les noyaux interne et externe sont plus lourds que les couches superficielles de la Terre : ils constituent 16% du volume de la planète, mais portent 33% de sa masse. La discontinuité de Gutenberg à $-2\,900$ kilomètres marque le passage du noyau externe au manteau solide, qui s'étend jusqu'à -670 kilomètres, puis au manteau supérieur et enfin à la lithosphère, couche superficielle. Nous ne nous étendrons pas sur ces facettes de la planète qui n'ont pas d'influence sur notre propos.

Contrairement à une idée reçue, l'axe magnétique ne dépend pas de l'axe de rotation de la planète, mais du mouvement global du plasma du noyau externe liquide⁴. Ainsi, il existe à l'heure actuelle un angle de 11 degrés entre les deux axes, angle en perpétuel changement.

4 Cela signifie en particulier que la force de Coriolis, qui tend à aligner l'axe du dipôle magnétique sur l'axe de rotation, ne suffit pas à expliquer les mouvements d'ensemble du noyau liquide.

Le champ magnétique terrestre est, en première approximation, celui du dipôle. Il est dirigé du sud vers le nord de la Terre. Le pôle nord magnétique se situe actuellement sur les territoires du Nord-Ouest du Canada.

Comme l'axe magnétique et l'axe de rotation de la Terre ne sont pas alignés, on peut aussi construire un système de coordonnées magnétiques (figure 2.6). Celui-ci est calqué sur le système de coordonnées géographiques décrit précédemment : les méridiens relient les deux pôles magnétiques, le sud et le nord. L'équateur magnétique se trouve en tout point à égale distance de ces pôles, et les parallèles magnétiques lui sont, naturellement, parallèles. Pour assurer la pérennité de ce système en dépit du mouvement parfois irrégulier du champ magnétique, on se réfère à un modèle simple de champ magnétique, pas très éloigné de la réalité : le champ dipolaire identique à

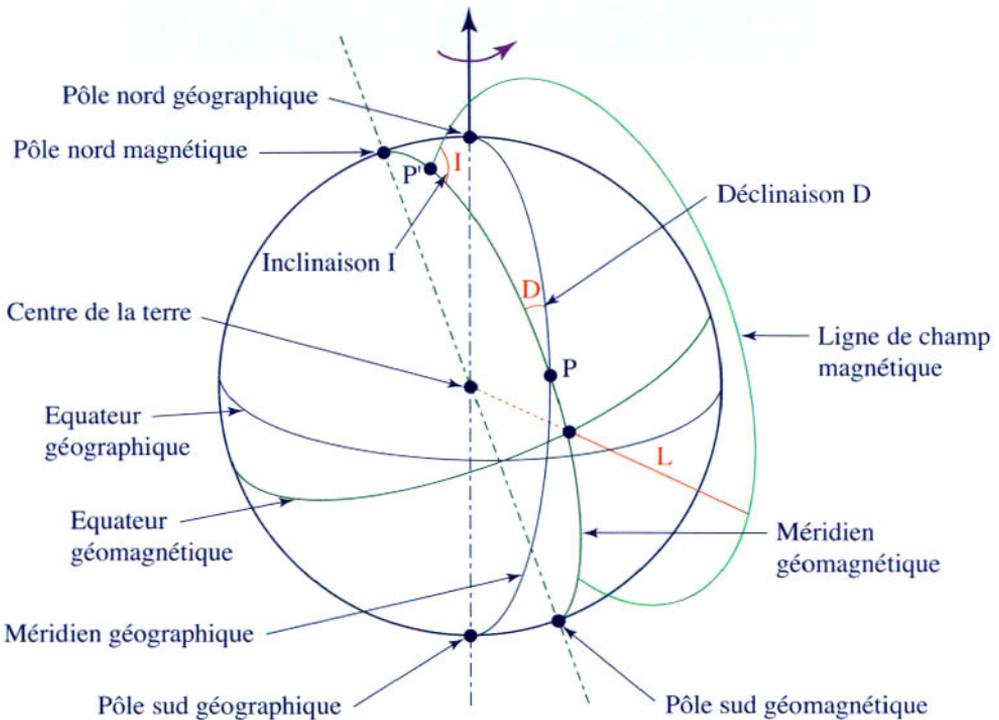


Figure 2.6 - Coordonnées géomagnétiques

La déclinaison D (angle entre le méridien géographique et la direction horizontale du champ magnétique) et l'inclinaison I (angle entre le vecteur local du champ et le plan local horizontal) sont représentées par les traits rouges. Par souci de lisibilité, la déclinaison est représentée en un point P de la surface terrestre, et l'inclinaison en un point P' distinct. Bien sûr, ces deux paramètres peuvent être déterminés conjointement en un même point. L est le paramètre de Mc Illwain (distance entre le centre de la Terre et l'endroit où la ligne de champ magnétique coupe le plan équatorial). Ces trois paramètres sont discutés dans le texte.

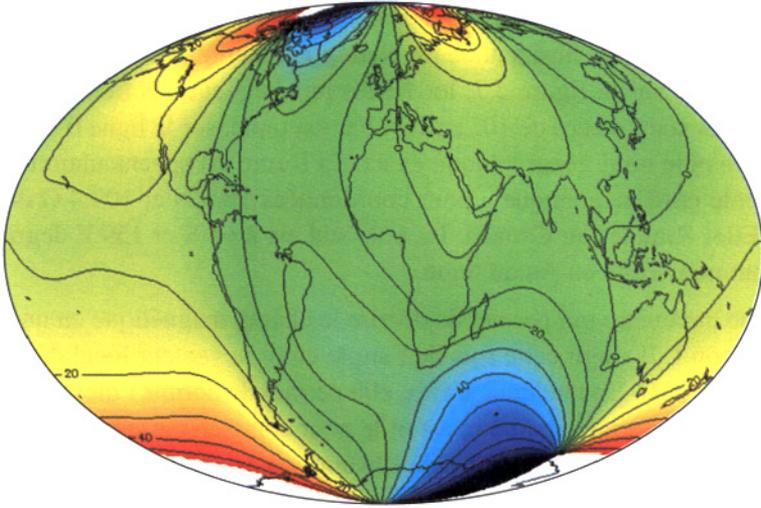


Figure 2.7 - Déclinaison terrestre en degrés moyennée sur l'année 2000 et calculée par un modèle international (IGRF) (crédit NGDC-NOAA)

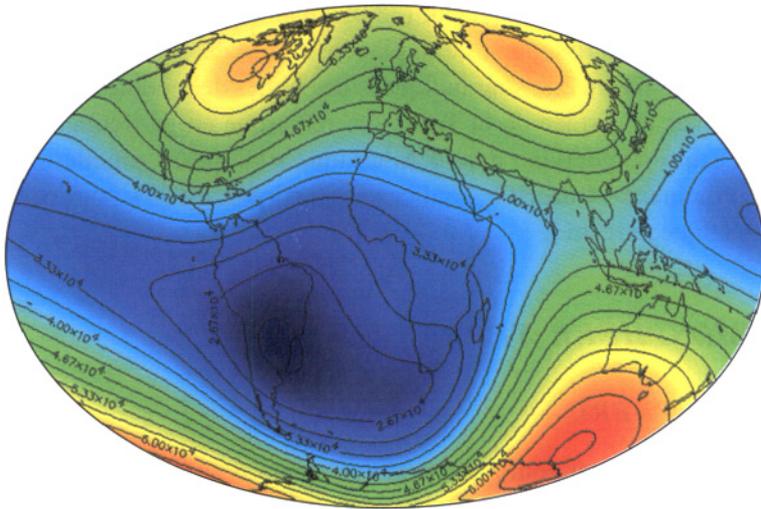


Figure 2.8 - Champ magnétique total à la surface de la Terre, en nanoteslas, généré en utilisant un modèle international (IGRF)

Il s'agit d'une moyenne sur l'année 2000. Les zones rouges indiquent un champ magnétique plus intense, et les zones bleues une intensité de champ plus faible (crédit NGDC-NOAA).

celui d'un aimant parfaitement homogène⁵. Ce système permet de se repérer en coordonnées magnétiques. Cependant, pour des études précises de la Terre, il faut des paramètres qui décrivent le champ tel qu'il est et non modélisé par un dipôle. Le

⁵ Voir l'expression du dipôle en annexe 4.

premier paramètre est la déclinaison D . Il s'agit de l'angle entre le méridien géographique et la composante horizontale du champ magnétique, comme on peut le voir sur la figure 2.6. Sur la figure 2.7, les lignes représentent des lieux de déclinaison constante. Elles sont tracées de 10° en 10° . Par exemple, sur la ligne 0° , une boussole indiquerait le pôle nord géographique exact. Sa forme est spectaculairement irrégulière ! Le pôle nord magnétique a pour coordonnées 78.5 N et 103.4 O degrés, près de l'île d'Ellef Ringnes au Canada. Le pôle sud est à 65 S et 139 E degrés, dans la baie du Commonwealth en Antarctique.

Le deuxième paramètre qui permet de décrire le champ magnétique en un lieu donné est l'inclinaison I . Il s'agit cette fois de l'angle entre le vecteur local du champ et le plan local horizontal. En quelques sortes, elle permet de définir l'élévation du champ vers le ciel. Un troisième paramètre est utile pour caractériser le champ magnétique. On l'appelle parfois le paramètre de Mc Illwain, qui est noté conventionnellement L sur la figure 2.6. Il s'agit de la distance entre le centre de la Terre et l'endroit où la ligne de champ magnétique coupe le plan équatorial. Pour des raisons pratiques, on le compte en unités de rayon terrestre. Enfin, naturellement, nous pouvons mesurer le module du champ magnétique. Elle est plus grande aux pôles, où elle vaut environ $70\,000$ nanoteslas (nT), qu'à l'équateur ($33\,000$ nanoteslas à l'équateur magnétique). Cet écart est dû à l'aplatissement de la planète et à la décroissance en r^3 du dipôle magnétique. Sur la figure 2.8, sont indiquées des lignes de module de champ magnétique constant sur la surface de la Terre. On remarque en particulier un minimum marqué du champ magnétique dans l'Atlantique sud, qu'on appelle une anomalie magnétique (l'annexe 14 décrit les indices magnétiques utilisés pour caractériser le champ magnétique terrestre).

3. L'ATMOSPHERE TERRESTRE

3.1. L'HOMOSPHERE

L'atmosphère terrestre est composée principalement d'azote moléculaire (78%), et d'oxygène moléculaire (21%). La météorologie classique concerne la zone qui s'étend depuis la surface jusqu'à 16 kilomètres d'altitude en moyenne (environ 17 kilomètres à l'équateur et 8 kilomètres aux pôles). Toute cette couche prend le nom de "troposphère". L'air y connaît un brassage permanent, qui mélange ses constituants.

Le flux d'énergie solaire qui arrive perpendiculairement au Soleil à une Unité Astronomique est de $1366,1$ $W\ m^{-2}$. Cependant, si l'on tient compte de la sphéricité de la Terre, il faut diviser cette valeur par quatre (soit 342 $W\ m^{-2}$) pour obtenir la moyenne globale de l'énergie qui arrive sur la Terre. 60% de cette énergie contribue à chauffer la surface, et 40% est réfléchi ou diffusé par la surface en direction de l'espace (l'albédo est le rapport entre l'énergie réfléchie ou diffusée et celle reçue. Il tend vers 1 pour la neige par exemple, et vaut donc 0,4, en moyenne, à la surface terrestre).

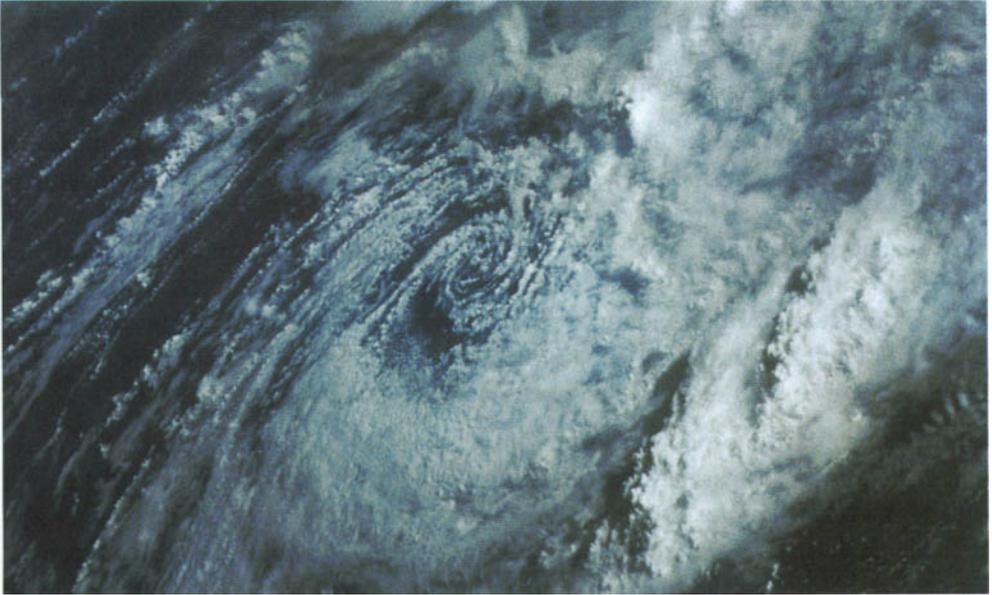


Figure 2.9 - La troposphère correspond à la zone de l'atmosphère objet de la météorologie classique

Elle contient l'essentiel de l'eau de l'atmosphère. On voit ici une dépression atmosphérique (crédit J.P. Haigneré, CNES).

L'énergie absorbée à la surface de la Terre chauffe le sol et, par conduction et convection, chauffe ensuite l'air de la couche la plus basse de l'atmosphère. Elle produit également une importante évaporation des mers et lacs. Ce phénomène, accru par la transpiration des végétaux conduit à un taux d'humidité relative⁶ supérieur à 50% en moyenne sur le globe dans la troposphère, qui contient à elle seule 99% de la vapeur d'eau atmosphérique.

La pression et la masse volumique diminuent en fonction de l'altitude suivant une loi exponentielle⁷. Lorsqu'on s'élève, la température décroît de façon linéaire dans la troposphère, de 6 à 7 degrés par kilomètre. Cette dernière valeur dépend grandement

6 L'humidité relative, ou degré hygrométrique, est un nombre sans dimension. Il exprime (généralement en pourcentage) le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température. Un taux de 100% signifie que l'air est saturé en eau vapeur.

7 Il s'agit de la loi barométrique. Elle s'applique aussi bien à la pression qu'à la concentration et s'écrit : $P(z) = P(z_0) e^{-\frac{z-z_0}{H}}$, z_0 est une altitude de référence. H s'appelle la hauteur d'échelle, et vaut $H = \frac{k_b T}{m g}$ (m est la masse moyenne des molécules du gaz, T leur température, g l'accélération de la gravitation et k_b la constante de Boltzmann). La loi barométrique est démontrée en annexe 15.

du taux d'humidité relative de l'air, car en s'élevant, la vapeur d'eau condense et ralentit le refroidissement de l'air. Ainsi, la décroissance est-elle de 9,8 degrés par kilomètre pour un air totalement sec et de 5 degrés par kilomètre pour un air saturé en eau.

Les lois dont nous venons de faire mention reflètent le fait bien connu selon lequel "l'air chaud, plus léger, monte". En montant, il se refroidit, la densité augmente et l'air redescend. Des cellules de convection se créent ainsi, entraînant une instabilité. En revanche, lorsque l'air est plus chaud aux altitudes élevées qu'aux altitudes basses, le milieu est stable : l'air froid, plus lourd, reste en bas. C'est le mécanisme d'inversion de température, qui couvre parfois le sol d'une chape de brume l'hiver, alors que quelques mètres plus haut brille le Soleil. Cela va également permettre d'expliquer le comportement de la couche suivante de l'atmosphère.

Au-dessus de la troposphère et jusqu'à environ 50 kilomètres d'altitude, la stratosphère se caractérise par la disparition progressive de l'eau. L'énergie solaire entrant directement dans l'atmosphère ou réémise par le sol n'est plus utilisée par condensation. Elle est consommée en grande partie pour chauffer ou dissocier des molécules, en particulier de l'ozone (avec un maximum d'efficacité vers 40 kilomètres) et de l'oxygène moléculaire (avec un maximum d'efficacité vers 20-25 kilomètres). Le rayonnement responsable de la première dissociation (celle de l'ozone) se situe entre 240 et 310 nanomètres, et celui responsable de la seconde (celle de l'oxygène moléculaire)

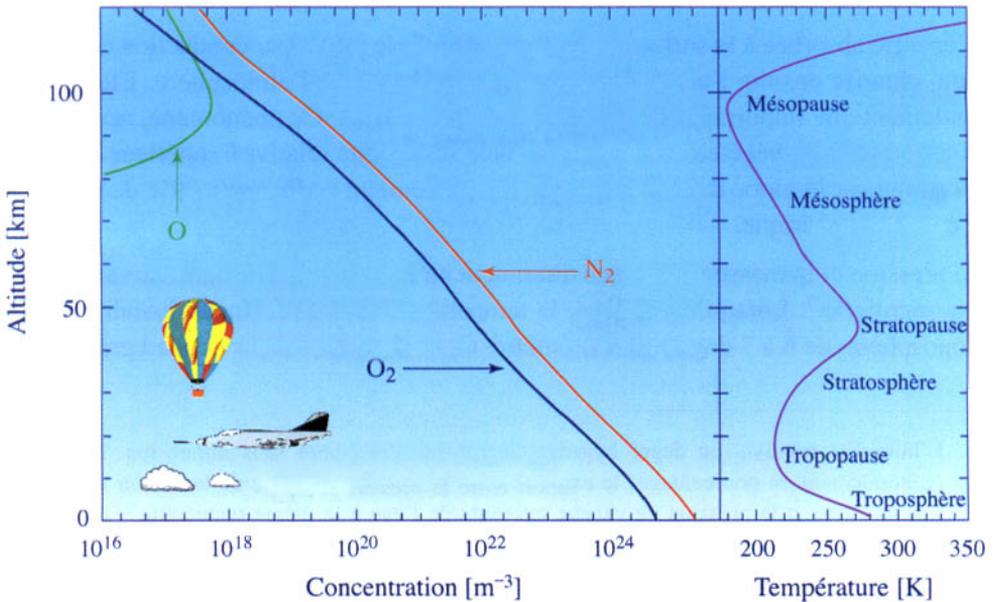


Figure 2.10 - Structure verticale de l'homosphère obtenue par le modèle MSIS 95 Il s'agit d'un début d'avril calme, à midi, à 45° de latitude nord : à gauche, profils de concentration ($[m^{-3}]$) des principaux constituants depuis le sol jusqu'à 120 kilomètres (N_2 en rouge, O_2 en bleu foncé, O en vert) ; à droite, profil vertical de la température ($[K]$) en fonction de l'altitude.

laire) entre 200 et 240 nanomètres c'est-à-dire dans l'ultraviolet (voir tableau des rayonnements en annexe 8). Grâce à sa fonction de filtre de l'ultraviolet, la stratosphère a permis à la vie de se développer sur Terre. La température de la stratosphère croît lorsqu'on s'élève, ce qui tranche avec celle de la troposphère immédiatement en dessous. Ce phénomène est dû aux réactions de dissociation qui sont exothermiques (elles dégagent de la chaleur). La température remonte donc jusqu'à des valeurs d'environ 0 °C.

La limite haute de la stratosphère, vers 50 kilomètres, s'appelle la stratopause. Au-dessus, nous entrons dans la mésosphère. La concentration d'ozone diminue. Sa dissociation, qui fournissait de la chaleur, cesse d'être une source de chauffage si bien que lorsqu'on s'élève, la température décroît. Cela se produit jusqu'à environ 85 kilomètres. La mésosphère est une partie encore mal connue de notre atmosphère terrestre. Elle est à la fois trop haute pour qu'il soit possible de mesurer facilement ses paramètres depuis le sol ou pour y faire voler les ballons-sondes, et trop basse pour y faire voler des satellites. Nous la connaissons entre autres par des sondages au moyen de lasers (des LIDARS) et par l'étude de son rayonnement propre.

Dans toutes les couches "basses" que nous venons de décrire, les molécules et atomes se mélangent, donnant un gaz homogène. On peut parler d'une température atmosphérique, d'une concentration, et ces termes s'appliquent à l'ensemble de l'atmosphère. C'est pourquoi, du sol jusqu'à 85 kilomètres, on désigne l'atmosphère sous le nom générique d'homosphère. La concentration au sol est d'environ 10^{25} particules par mètre cube, elle est de 10^{19} particules par mètre cube à l'homopause, sa limite supérieure. La pression au sol est de l'ordre de 1 015 hectopascals (hPa), qu'on appelle encore parfois une pression d'une "atmosphère".

3.2. L'HÉTÉROSPHÈRE, LA THERMOSPHERE, L'IONOSPHERE

Au-dessus de l'homosphère commence l'hétérosphère. C'est une partie de l'atmosphère dont les propriétés n'ont pu être explorées qu'avec l'avènement des communications radio, dans le courant du vingtième siècle. Par la suite, des techniques radar sophistiquées et des mesures par satellites ont révélé un milieu complexe, dynamique, un gaz composé d'un mélange de particules chargées électriquement et d'autres neutres. Cette enveloppe suscite encore bien des questions, en particulier celle de son rôle dans l'écosystème terrestre et dans l'émergence de la vie sur la Terre.

C'est dans l'hétérosphère que commence l'espace, dont la limite basse légale est 80 kilomètres. C'est là aussi que débute vraiment le domaine de la météorologie de l'espace.

Dans l'hétérosphère, la concentration en molécules et atomes devient très faible, et chaque constituant agit comme s'il était seul. Le comportement de gaz parfait de l'homosphère tout entière s'applique à présent séparément à l'azote, à l'oxygène, à l'hydrogène, avec une différence fondamentale : chacun d'eux possède sa propre hau-

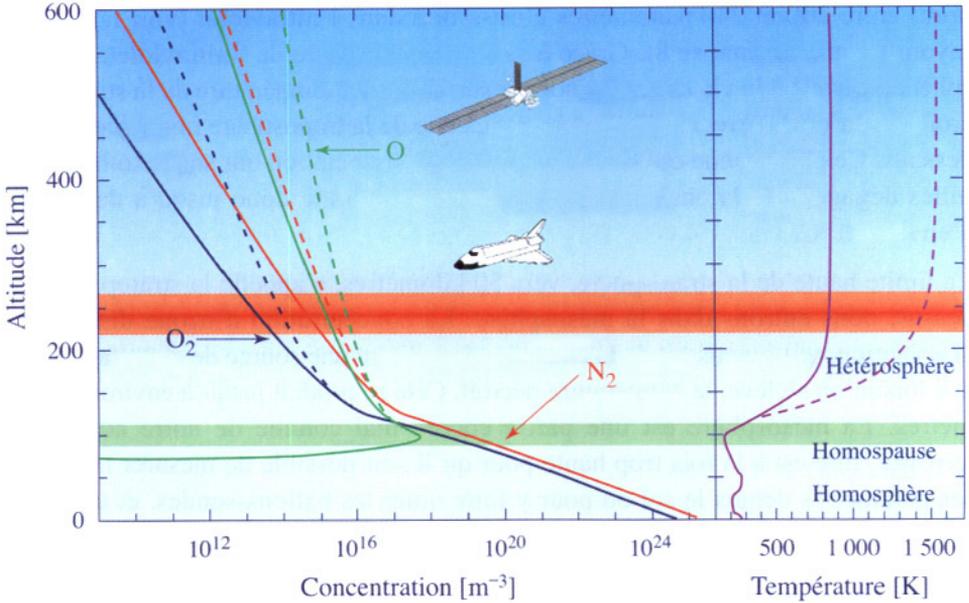


Figure 2.11 - Structure verticale de l'atmosphère obtenue par le modèle MSIS 95
 Il s'agit d'un début d'avril calme, à midi, à 45° de latitude nord : à gauche, profils de concentration ($[m^{-3}]$) des principaux constituants depuis le sol jusqu'à 120 kilomètres (N_2 en rouge, O_2 en bleu foncé, O en vert) ; à droite, profil vertical de la température ($[K]$) en fonction de l'altitude. Les traits pleins correspondent à une activité solaire calme ($f_{10.7} = 80$), et les traits pointillés à une activité solaire importante ($f_{10.7} = 300$). On note que l'homosphère n'est pas affectée par ce changement d'activité. Les bandes verte et rouge figurent les altitudes d'émission des raies verte et rouge de l'oxygène atomique.

teur d'échelle. La conséquence immédiate est une variation de leur concentration exponentielle, mais avec des facteurs de décroissance différents⁸. C'est ce qu'illustre la figure 2.11 : vers 80 kilomètres, l'azote moléculaire est prépondérant, devant l'oxygène moléculaire. Au-dessus d'environ 250 kilomètres, l'oxygène atomique est majoritaire. Vers 1 000 kilomètres cependant, l'hydrogène est à son tour l'élément le plus abondant : puisqu'il n'y a plus de mélange convectif, les éléments les plus lourds restent dans les basses couches, et les plus légers "flottent" au-dessus.

Une caractéristique fondamentale de l'hétérosphère est de constituer un filtre pour le rayonnement dans l'extrême ultraviolet (EUV). L'homosphère, on l'a vu, filtre efficacement quelques parties de l'ultraviolet solaire. Mais le Soleil émet également un

8 La concentration de chaque gaz varie suivant une loi en $e^{-\frac{z - z_0}{H_i}}$, H_i dépendant du gaz i de masse m_i : $H_i = \frac{k_b T}{m_i g}$.

rayonnement d'énergie supérieure à la dizaine d'électronvolts et fortement corrélé à l'activité solaire. Ce rayonnement, s'il atteignait la surface de la Terre, empêcherait toute vie de s'y développer. Comment ce rayonnement est-il filtré ? Par trois processus bien identifiés. Le premier est l'ionisation : le rayonnement arrache un électron périphérique aux atomes et molécules qu'il frappe, créant un électron et un ion. Le second est l'excitation : en absorbant du rayonnement, l'atome ou la molécule s'accélère, s'échauffe, la molécule vibre et tourne, les électrons en son intérieur changent de niveau d'énergie. Troisième possibilité d'absorption du rayonnement, la dissociation est le phénomène qui casse une molécule en plusieurs parties.

Fort heureusement, la haute atmosphère subit ces phénomènes⁹, et empêche ainsi l'extrême ultraviolet de descendre plus bas qu'environ 80 kilomètres d'altitude. L'atmosphère s'ionise donc partiellement.

Aux basses altitudes, dans la troposphère par exemple, si un phénomène tel qu'un éclair d'orage crée des ions et des électrons, ceux-ci sont immédiatement recombinaisonnés pour redonner des atomes ou des molécules, parce que l'atmosphère est dense et qu'ils ne peuvent aller bien loin, tout au plus quelques millimètres, sans cogner une nouvelle particule. Au-dessus de 80 kilomètres environ, il en est autrement : l'atmosphère est si ténue (voir figure 2.11) que les ions et les électrons peuvent se déplacer sur des distances énormes, de l'ordre de 10 kilomètres à 200 kilomètres d'altitude, avant de rencontrer un atome, une molécule ou un autre ion.

Nous voici donc dans un milieu fort différent de toute la matière familière, un mélange de gaz neutre, d'ions plus ou moins excités et d'électrons. Le gaz neutre a reçu le nom de thermosphère. Le gaz ionisé, ions et électrons confondus, est l'ionosphère. Ce mélange est un plasma, le plasma atmosphérique. Ses propriétés sont tout à fait différentes de celles d'un gaz classique constitué de particules neutres, puisque le mouvement des particules chargées est sensible aux champs électriques et magnétiques. Cependant, la proportion de particules chargées reste faible devant celle des particules neutres : de l'ordre du milliardième à 100 kilomètres d'altitude, et du dixième vers 1 000 kilomètres d'altitude. Les propriétés du plasma atmosphérique sont également très différentes de celles de l'atmosphère des basses altitudes. En effet, elles dépendent de façon très étroite du rayonnement solaire dans l'extrême ultraviolet, et donc de l'activité solaire. En période de Soleil calme, les ions et électrons créés en absorbant l'énergie des photons ont une température qui peut paraître élevée : de l'ordre de 1 000 kelvins pour les ions à 400 kilomètres, 1 500 pour les électrons. Mais ces valeurs sont faibles en comparaison de ce qu'elles prennent lors

9 Les seuils d'ionisation, c'est-à-dire les seuils requis pour arracher un électron périphérique aux atomes et molécules, valent respectivement 12,1 électronvolts pour O₂, 13,61 électronvolts pour O et 15,58 électronvolts pour N₂. Les seuils d'excitation sont bien plus bas. Celui d'une des plus importantes excitations dans l'atmosphère, celle de la structure fine de l'oxygène, est de 0,5 électronvolts.

d'évènements solaires particulièrement actifs : la température des ions peut alors atteindre 3 000 kelvins, et celle des électrons 9 000 kelvins à la même altitude de 400 kilomètres. Au cours d'une même journée, on assiste à des variations très significatives, comme le montre la figure 2.12 : doublement de la concentration électronique à 400 kilomètres entre 6 heures et midi, des variations de plus de 100 kelvins sur les températures électroniques et ioniques...

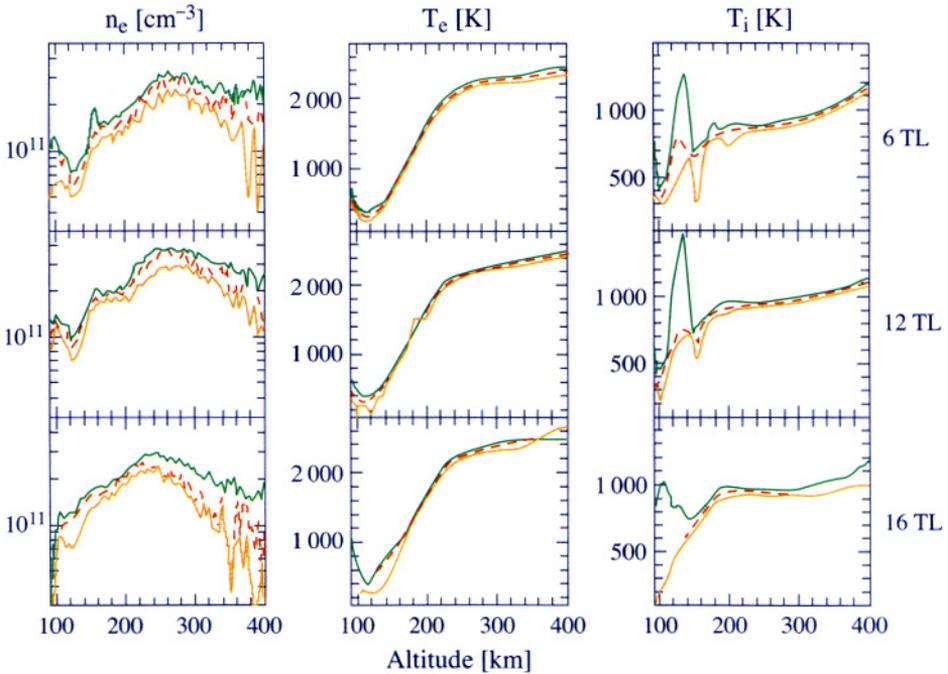


Figure 2.12 - Variations typiques de la concentration électronique (n_e), de la température électronique (T_e) et ionique (T_i) (mesurées par le radar EISCAT à Tromsø, en Norvège), en fonction de l'altitude à trois instants différents d'une même journée

Il s'agit du mois de juin 1994 : le Soleil éclaire toujours l'atmosphère à cette latitude, au nord du cercle polaire. Les heures locales sont marquées à droite des courbes. A 6 heures LT, le maximum de la région F se trouve vers 280 kilomètres, et baisse jusqu'à environ 240 kilomètres à mesure que le Soleil éclaire les couches plus basses de l'atmosphère. La couche E, bien marquée en fin de nuit, se remplit peu à peu dans la journée. Le Soleil était actif ce jour-là, ce qui a entraîné des températures élevées : plus de 2 500 kelvins à 400 kilomètres pour les électrons, et entre 1 000 et 1 500 pour les ions. Le trait pointillé montre les profils aux heures exactes indiquées, et les traits pleins montrent les minima et maxima atteints au cours des 30 minutes de part et d'autre de l'heure exacte, ce qui donne une indication de la variabilité de l'ionosphère. La température ionique, très sensible à la présence de champs électriques en région E, montre une variation de plusieurs centaines de kelvins.

La nomenclature de l'ionosphère respecte encore l'histoire de sa découverte, dans les premières années de la conquête spatiale :

- ◆ la région D en dessous de 80 kilomètres, où les ions négatifs prédominent ;
- ◆ la région E entre 85 et 150 kilomètres, où dominent les ions moléculaires positifs (principalement O_2^+ et NO^+) ;
- ◆ la région F_1 entre 150 et 200 kilomètres, qui assure la transition entre ions moléculaires (principalement NO^+) et ions atomiques positifs (principalement O^+) ;
- ◆ la région F_2 où l'ion O^+ est l'espèce ionique majoritaire, caractérisée par la transition entre les mécanismes photochimiques (en dessous) et les mécanismes de diffusion (au-dessus) ;
- ◆ la haute ionosphère où l'ion H^+ devient prépondérant après sa création par échange de charge avec l'ion O^+ puis sa diffusion.

Tableau 2.2 - Paramètres typiques des couches atmosphériques

Altitude [km]	75	100	150	200	400	800	1 200	3 000
“Couche”	D	E	F_1	F_2		F sup		
n_n [m^{-3}]	10^{21}	10^{18}	5×10^{16}	8×10^{15}	10^{14}	10^{12}	2×10^{11}	10^{10}
n_e / n_n	10^{-12}	3×10^{-9}	4×10^{-6}	10^{-4}	4×10^{-3}	4×10^{-2}	10^{-1}	1
T_e	200	200	700	1 500	2 500	3 000	3 200	3 500
T_i	200	200	600	800	1 000	2 500	3 000	3 400

n_n est la concentration des neutres (thermosphère), n_e la concentration électronique (ionosphère), T_e et T_i les températures électroniques et ioniques.

Ces régions ionisées trouvent essentiellement leur origine dans le rayonnement solaire des photons les plus énergétiques. Cependant, une autre source crée, principalement entre 90 et 125 kilomètres d'altitude (et à un degré moindre jusqu'à 300 kilomètres), une ionisation sporadique, qui existe aussi bien côté jour que côté nuit de la Terre : il s'agit des météorites. Celles-ci s'échauffent par friction en pénétrant dans l'atmosphère, et apportent suffisamment d'énergie pour ioniser le gaz. A plus haute altitude, le nombre de molécules est insuffisant pour provoquer une friction importante. A plus basse altitude, les recombinaisons chimiques sont trop rapides pour permettre aux électrons et aux ions d'avoir une durée de vie conséquente. C'est pourquoi les météorites exercent leur influence essentiellement en région E. Cette action peut ajouter 100 à 1 000 électrons par centimètre cube à l'ionosphère, et y créer des ions magnésium, absents d'une ionosphère ionisée uniquement par des photons.

Nous avons indiqué que le rayonnement électromagnétique dans l'extrême ultraviolet pouvait être absorbé par ionisation, mais aussi par d'autres phénomènes : dissociation, excitation, chauffage. Tous ces phénomènes entrent en compétition quand l'énergie des photons est supérieure aux seuils d'ionisation. Aux énergies inférieures à ces seuils, en dessous d'une douzaine d'électronvolts ou, en terme de longueur

d'onde, au-dessus d'environ 100 nanomètres ¹⁰, le rayonnement est également abondant et influence la thermosphère de façon considérable.

Son efficacité dans le phénomène de dissociation est maximale entre 100 et 110 kilomètres. Le rayonnement dissocie notamment l'oxygène moléculaire en oxygène atomique, qui diffuse ensuite vers les basses altitudes.

Le rayonnement électromagnétique excite également les atomes et les molécules thermosphériques, qui reviennent tôt ou tard à leur état d'équilibre. Cela peut se faire par des recombinaisons chimiques. Cela se fait souvent par l'émission d'un, parfois deux photons dans l'ultraviolet, le proche infrarouge et même dans le visible. L'oxygène, en particulier, connaît deux signatures intenses, l'une dans le vert, vers 100 kilomètres d'altitude, et l'autre dans le rouge, vers 250 kilomètres d'altitude. Ces raies sont difficiles à observer dans le ciel diurne car leur intensité est faible en comparaison du rayonnement solaire visible. En revanche, une visée au limbe ¹¹ les révèle, majestueuses coquilles lumineuses au-dessus de notre planète.

Nous avons abordé les phénomènes d'ionisation, de dissociation et d'excitation. La quatrième façon par laquelle la haute atmosphère absorbe le rayonnement électromagnétique du Soleil est le chauffage. Il n'est donc pas surprenant que la variation de la température de la thermosphère soit étroitement liée au rayonnement solaire.

La source de chauffage est indirecte : c'est la friction des particules excitées sur celles qui ne le sont pas, ainsi que les réactions chimiques qui chauffent l'atmosphère et non directement une interaction entre l'atmosphère et le rayonnement solaire. La température croît considérablement lorsqu'on s'élève au-dessus de la mésosphère, de l'ordre de 8 à 18 degrés par kilomètre entre 100 et 150 kilomètres (voir figure 2.11). Il s'agit d'un gradient positif de température : l'air chaud ne monte plus, puisqu'il est déjà au-dessus. La convection est inhibée, et seule la conduction peut transférer l'énergie d'une couche à l'autre.

Ce chauffage est efficace jusque vers 200-300 kilomètres, altitude au-delà de laquelle l'atmosphère est trop ténue pour assurer une conduction de la chaleur. Au-dessus, la température devient constante (voir figure 2.11). On l'appelle alors la température exosphérique T_{∞} . Elle vaut typiquement entre 1 000 et 1 200 kelvins en période de Soleil calme, mais elle peut excéder 2 000 kelvins en période active. C'est en raison de ces valeurs élevées que cette région de l'atmosphère s'appelle la thermosphère.

10 Selon les formules données dans le premier chapitre, l'énergie E peut être convertie en température et, lorsqu'il s'agit de la seule énergie cinétique, à l'exclusion d'énergie interne ou chimique par exemple, en vitesse. Retenons qu'une particule d'énergie 0,1 électronvolt correspond à une température de 1 100 kelvins. Par ailleurs, l'énergie d'un rayonnement est caractérisée par une longueur d'onde. Ainsi, un rayonnement de longueur d'onde inférieure ou égale à 100 nanomètres (extrême ultraviolet) possède une énergie supérieure à environ 12,4 électronvolts.

11 Bord lumineux du disque d'un astre (illustré par les figures 2.13 et 2.14).



Figure 2.13 - Vers 110 kilomètres d'altitude, la raie verte brille au-dessus de la Terre (qui apparaît très claire et lumineuse en contraste), photographiée ici par les cosmonautes de la navette soviétique Saliout 6 en 1978 (crédit S. Koutchmy, IAP-CNRS)



Figure 2.14 - Emission de la raie rouge vers 250 kilomètres d'altitude, photographiée depuis la station soviétique Saliout 6 en 1978. Les traits bleus et blancs sont les étoiles qui semblent défilier pendant la prise de vue. En bas, le limbe de la Terre (crédit S. Koutchmy, IAP-CNRS).

Les quatre effets du rayonnement solaire sur la haute atmosphère – ionisation, dissociation, excitation, chauffage – dépendent de l'intensité du rayonnement et donc de l'activité solaire. Un afflux soudain de photons énergétiques, par exemple à la suite d'une éruption solaire, engendre une augmentation de la concentration en ions et en électrons et un chauffage accru de la thermosphère, qui provoque une dilatation du gaz atmosphérique. Les ions et les électrons se recombinaient chimiquement entre eux ou avec les atomes et molécules neutres. Ces réactions sont rapides, et équilibrent la production, si bien que l'ionosphère se vide rapidement et presque totalement côté nuit. Côté jour, la chimie entraîne de façon curieuse, vers 150 kilomètres, la prépondérance de l'ion d'oxyde d'azote, alors qu'il n'existe pratiquement pas d'oxyde d'azote neutre, son plus proche parent.

4. LA MAGNÉTOSPHERE

Faut-il encore parler d'atmosphère de la Terre lorsque, au-dessus d'environ 600 kilomètres d'altitude et jusqu'à plusieurs rayons terrestres, la concentration des particules devient si faible que leur comportement n'est plus déterminé par les collisions, mais par la configuration du champ magnétique ? De moins en moins à mesure qu'on s'élève. S'il n'y a pas de limite haute légale à l'atmosphère, l'environnement terrestre change en effet de nature, et devient la "magnétosphère".



Figure 2.15 - Vue d'artiste de la magnétosphère

Le Soleil est en haut à gauche de la feuille, et le vent solaire est symbolisé par des particules jaunes qui se déplacent dans l'espace. La magnétosphère entoure la Terre de différentes zones caractéristiques, identifiées ici au moyen de couleurs (en réalité, les photographies en lumière visible ne montrent aucune cavité de ce genre). Les lignes de champ magnétique deviennent, dans cette représentation en trois dimensions, des surfaces qu'on appelle des coquilles magnétiques. (crédit Editions Solar).

La figure 2.15 est une représentation de la magnétosphère, avec des couleurs qui mettent en évidence quelques-unes de ses zones caractéristiques. La différence avec la figure 2.5, qui montrait la forme des lignes de champ à proximité de notre planète, est spectaculaire, déroutante sans doute. Elle ne tient pas seulement au fait que nous montrons des coquilles magnétiques en trois dimensions plutôt que de simples lignes de champ en deux dimensions, mais à cette forme fuselée, à ces imbrications de secteurs aux frontières apparemment clairement identifiées. Ces caractéristiques étranges sont le fruit d'une interaction complexe, celle du champ magnétique terrestre et du vent solaire.

Rappelons que des électrons et des protons s'échappent en permanence du bouillonnement solaire, et que l'activité solaire conditionne l'expulsion sporadique d'ions et d'électrons additionnels, accompagnés d'une avalanche de rayonnement, en particulier dans l'ultraviolet. Le 3 juin 1999 par exemple, le télescope THEMIS a pu observer une éruption dont le déclenchement s'est opéré en moins d'un 25^e de seconde, simultanément sur plusieurs sites éruptifs éloignés de plusieurs milliers à 100 000 kilomètres les uns des autres ¹². Les éjections de masse coronale peuvent être corrélées à des éruptions, mais ce n'est pas systématiquement le cas.

Vent solaire et champ géomagnétique vont interagir de diverses manières. L'une d'entre elles est décrite en termes de pression magnétique d'une part (celle du champ de la Terre), et de pression cinétique d'autre part (celle du vent solaire). Par ailleurs, le champ magnétique agit sur les particules chargées du vent solaire.

En tout premier lieu, un champ magnétique force des charges électriques à décrire un mouvement de spirale autour de ses lignes de champ. Le sens dans lequel spiralent les particules dépend du signe de leur charge. Un autre processus se produit lorsque les particules chargées possèdent une vitesse initiale en pénétrant dans un champ magnétique. Elles sont alors soumises à une force qui sépare les charges positives des charges négatives, ce qui génère en retour un champ électrique qui tend à les rapprocher les unes des autres. C'est ainsi que la mise en interaction du vent solaire et du champ géomagnétique variable suffit à créer un environnement non plus seulement magnétique, mais électromagnétique.

Les flux de particules chargées sont caractérisés par la densité de courant électrique. Par définition, elle est proportionnelle à la différence entre le flux de charges positives et le flux de charges négatives ¹³. Elle est dirigée dans le sens de la vitesse des ions.

12 En un temps aussi bref, l'effet d'un site éruptif n'a pas pu se propager pour déclencher une autre éruption. En effet, la lumière elle-même, dont la vitesse constitue une limite supérieure infranchissable, parcourt 75 000 kilomètres en 1/25^e de seconde. Ces éruptions avaient donc une cause commune sous la photosphère.

13 Dans un mélange de particules d'espèces s chargées, caractérisées par des vitesses moyennes d'écoulement \overline{v}_s et des concentrations n_s , la densité de courant \overline{j} dans le référentiel local s'écrit : $\overline{j} = \sum_s q_s n_s \overline{v}_s$ où q_s représente la charge de l'espèce s (voir annexe 4).

Lorsque les ions prédominent, on la dit portée par les ions. Naturellement, elle est portée par les électrons dans le cas où ceux-ci prévalent, mais alors, elle est dirigée dans le sens opposé à celui de la vitesse électronique. On la note conventionnellement \vec{j} . Si un champ électrique est conventionnellement toujours orienté des charges positives vers les charges négatives, une densité de courant peut avoir une direction quelconque. Le courant électrique à travers une surface quelconque, est la somme intégrale de tous les courants à travers cette surface.

La physique de ces phénomènes (spirale autour d'une ligne de champ, séparation des charges ou création d'un courant électrique) est décrite en annexe 17. Il suffit pour présenter la magnétosphère, d'admettre qu'ils y règnent tous, à des degrés divers selon l'endroit d'étude. On peut ainsi définir la magnétosphère comme un système complexe de courants électriques, dont l'impact sur notre technologie moderne, satellites, télécommunications, repérage... est déterminant.

4.1. LA MAGNÉTOSPHERE ET LES SYSTÈMES DE COURANTS

Le vent lent parcourt en 3 jours la distance qui sépare le Soleil de la Terre, alors que pour le vent rapide, une dizaine d'heures suffisent, et seulement 8 minutes pour les rayonnements électromagnétiques. A l'approche de la Terre, les particules chargées électriquement subissent l'action du champ géomagnétique croissant. Il se produit alors une force perpendiculaire à la fois au vent et au champ (la force de Lorentz), qui dévie les ions vers le côté après-midi de la Terre (l'est) et les électrons vers le côté matin. La distance à laquelle se produit cette interaction est celle à laquelle la pression cinétique du vent solaire compense la pression magnétique du champ terrestre¹⁴. Ainsi, la Terre se trouve-t-elle protégée par une gaine magnétique le long de laquelle s'écoule le vent solaire : la magnétopause (figure 2.16).

La face avant de la magnétopause se trouve à environ dix rayons terrestres de la surface de la planète. Cependant, cette distance est plutôt de treize rayons terrestres en période d'activité solaire minimum, et de l'ordre de six lors d'événements solaires actifs (éruptions, éjections de masse coronale) ; sur ses flancs, la magnétopause se trouve à une quinzaine de rayons terrestres de la Terre. Côté nuit, elle prend la forme d'une queue de comète. A l'extérieur, l'espace est soumis au régime de vent solaire, et au champ magnétique interplanétaire. A l'intérieur – dans la "magnétosphère" –, c'est le champ géomagnétique de la Terre qui gouverne. La magnétopause se dresse comme un mur entre l'un et l'autre.

La séparation des charges du vent solaire côté jour induit un premier courant dit de magnétopause, constitué par le déplacement en sens inverse des ions (vers l'avant de la page sur la figure 2.16) et des électrons (vers l'arrière de la page sur cette figure).

¹⁴ Le calcul fait en annexe 18 montre que la position de la magnétopause sur la face avant de la magnétosphère se trouve à une distance d'environ 12,5 rayons terrestres.

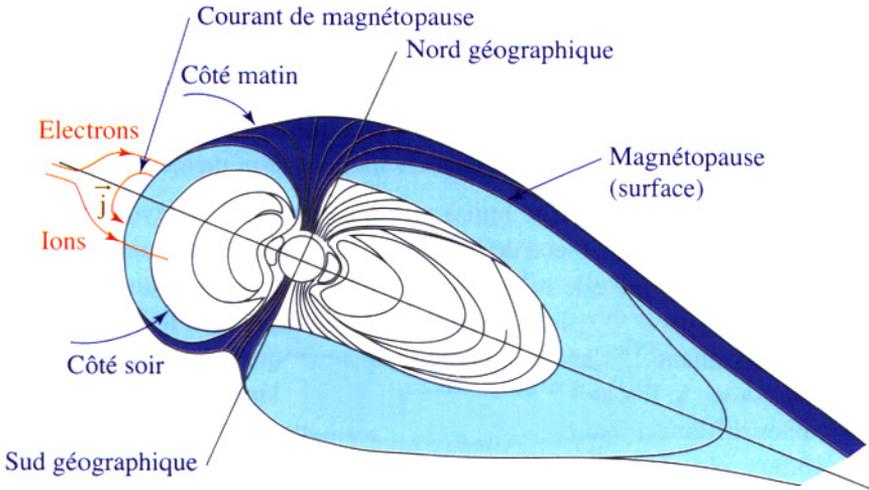


Figure 2.16 - Le vent solaire contourne la Terre et crée une surface protectrice, la magnétopause (ici en bleu)

Les ions se dirigent côté soir, en avant de la page, et les électrons côté matin, en arrière de la page. Cette séparation des charges au voisinage de la Terre engendre le courant de magnétopause, représenté par la flèche rouge.

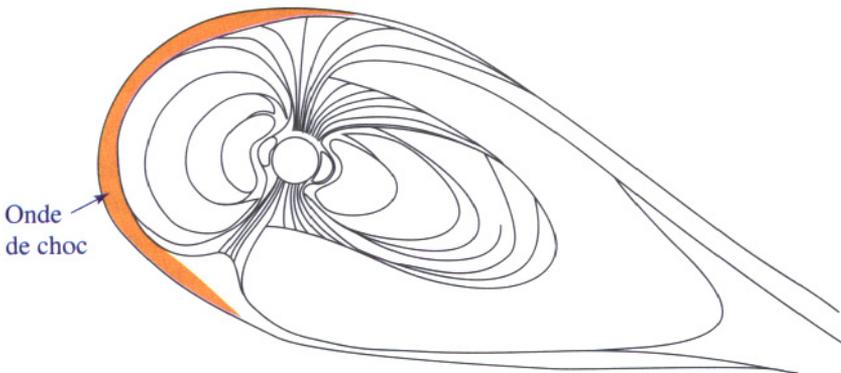


Figure 2.17 - En amont de la Terre, l'onde de choc (ici en orange) crée un échauffement du vent solaire. Celui-ci s'accélère avant de longer la magnétopause.

Plaçons-nous par la pensée en amont de la magnétosphère, sur l'axe qui se trouve entre la Terre et le Soleil. Du Soleil arrivent en permanence des particules à une vitesse moyenne de 370 km s^{-1} , correspondant à une énergie de l'ordre du dixième d'électronvolt pour les électrons, ou de la centaine d'électronvolts pour les ions. Cette vitesse, à l'abord de la magnétosphère, diminue dans le sens Soleil-Terre, tandis que les particules gagnent une accélération dans le sens perpendiculaire à cet axe, c'est-à-dire est-ouest. Entre environ douze et quatorze rayons terrestres, il se crée une zone de compression de la matière, où les chocs se font plus nombreux parce que les

particules rapides cognent les particules plus lentes dans la direction de la Terre. Le vent solaire s'échauffe (figure 2.17). Sous l'effet de ces collisions, les protons et les électrons gagnent une énergie considérable : ce n'est plus en dixièmes d'électronvolts qu'il faudra bientôt parler, mais en milliers d'électronvolts. Les particules qui contourment la Terre et forment la magnétopause sont donc extrêmement rapides.

La magnétosphère se referme côté nuit à plusieurs dizaines de rayons terrestres, et prend la forme de la coquille bleue de la figure 2.15. Sur ce dessin, nous voyons bien plus que la magnétosphère elle-même : nous distinguons sa structure interne. Cette représentation, en trois dimensions, met en évidence le fait que les lignes de champ magnétique constituent de véritables coquilles magnétiques. Le dessin les distingue au moyen de couleurs. Il s'agit d'un artifice qui permet simplement de mieux distinguer des zones différentes auxquelles nous allons nous intéresser : cornets polaires, ovales auroraux, plasmasphère, ceinture de radiations... Elles ont toutes des caractéristiques propres dues aux divers phénomènes induits par le Soleil et jouent des rôles particuliers dans la météorologie de l'espace.

Avant de les décrire, considérons l'échelle des astres en interaction : le diamètre du Soleil est 109 fois supérieur à celui de la Terre. Cela implique que le vent solaire ne fait pas que frapper la face avant de la magnétosphère, mais longe aussi ses flancs est-ouest ou ses frontières nord-sud : expulsées du Soleil, les particules qui croisent l'orbite de la Terre ont des devenir différents, et donc des actions différentes dans leurs relations avec notre planète. Pour ne pas se perdre dans ces trajectoires et phénomènes divers, suivons l'itinéraire de quelques familles de particules caractéristiques.

Considérons tout d'abord la famille de particules qui rencontre le champ géomagnétique dans l'axe Terre-Soleil (figure 2.18). On observe deux phénomènes : un échauffement et une séparation de charges par déviation des ions vers le côté soir et des électrons vers le côté matin. Leurs trajectoires ne peuvent pourtant pas être simplement orientées dans la direction est-ouest, car d'autres particules continuent d'arriver régulièrement en provenance du Soleil en un flux permanent. Pour cette raison, les ions (côté soir) et les électrons (côté matin) reprennent un mouvement vers le côté nuit de la Terre. En longeant la magnétopause, ils se refroidissent progressivement pour retrouver leurs caractéristiques initiales vers 100 à 200 rayons terrestres, loin de la face nocturne.

Quel type de particules trouvons-nous sur les flancs de la magnétosphère ? Un mélange de vent solaire globalement neutre en provenance directe du Soleil, et de particules qui ont été accélérées sur la face avant de la magnétosphère, et dont les charges se répartissent à l'est et à l'ouest de la magnétosphère. Pour toutes ces particules, le mur-magnétopause n'est pas une frontière parfaitement imperméable : entre 5% et 10% environ d'entre elles la traversent, aussi bien sur sa face avant que le long de ses flancs, tandis que la majeure partie se dirige vers l'espace interplanétaire. A une distance de 100 à 200 rayons terrestres, l'effet du champ géomagnétique n'est plus assez intense pour éviter que, venues d'est, d'ouest, du nord ou du sud, les parti-

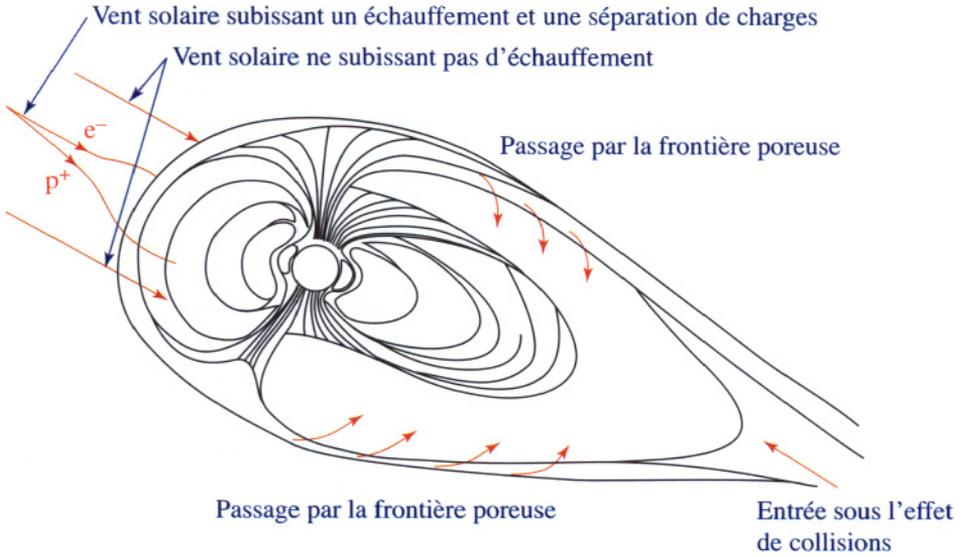


Figure 2.18 - Entrées de particules du vent solaire dans la magnétosphère

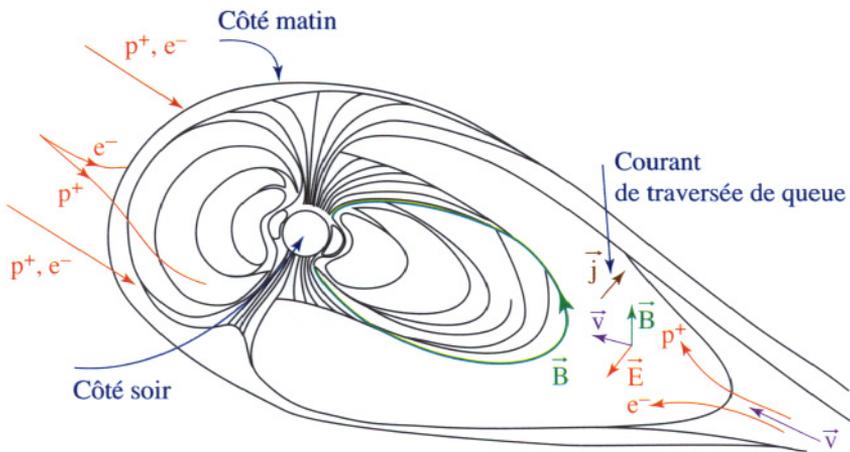


Figure 2.19 - Création du champ électrique \vec{E} et d'un courant \vec{j} traversant la magnétopause

Les particules du vent solaire qui sont arrivées sur la face avant de la magnétosphère ont subi une séparation de charge (p^+ signifie protons, et e^- électrons). A l'intérieur de la magnétosphère, les ions sont attirés côté matin et les électrons côté soir, mais tous subissent une force sous l'effet conjugué du champ électrique et du champ géomagnétique \vec{B} . Ils sont contraints de se déplacer vers la Terre (vitesse \vec{v}).

cules du vent solaire se retrouvent, en un lieu dit de "reconnexion". Heurts, collisions permettent une entrée supplémentaire de particules dans la magnétosphère. C'est grâce à ces portes d'entrée que la cavité magnétosphérique contient une partie (faible) des ions et électrons qui, quelques heures à quelques jours plus tôt, étaient expulsés du Soleil.

Ce petit groupe de particules, ayant pénétré dans la magnétosphère, est désormais protégé du vent solaire et n'est plus soumis qu'aux forces électromagnétiques. Les ions se dirigent vers la frontière côté matin, attirés par le flux d'électrons qui s'écoule sur son flanc externe. Pour leur part, les électrons internes se dirigent vers la frontière côté soir. Vue de l'extérieur, la neutralité est respectée. Mais vu de l'intérieur de la magnétosphère, il règne un champ électrique entre les particules chargées positivement et les électrons internes à la magnétosphère. Ce champ traverse toute la magnétosphère du côté matin vers le côté soir (figure 2.19). Il emplit l'ensemble de la magnétosphère, depuis la queue jusqu'à l'avant de la Terre. Il peut varier très rapidement en intensité. En effet, le vent solaire est constitué d'un mélange de vent rapide et de vent lent, l'un bousculant l'autre. De plus, les particules chauffées à l'avant de la magnétosphère et qui la longent ensuite, heurtent d'autres particules du vent solaire qui n'ont pas subi ces processus. Il n'est donc pas étonnant que d'une minute à l'autre, le flux de particules en un point quelconque de la magnétopause se modifie, entraînant des variations du champ électrique à l'intérieur de la magnétosphère.

Ces variations du flux de particules ont une conséquence immédiate sur la forme de la magnétopause. Depuis les premières mesures de la constellation de satellites CLUSTER, en 2001, il fut observé que la magnétopause n'est pas cette surface lisse que montrent nos figures. La magnétosphère se dilate lorsque le vent solaire est peu intense, et se contracte lorsqu'il se renforce. Ces phases de compression et de dilatation se succèdent si rapidement que la magnétopause ressemble à une surface ondulée. Les ondulations ont plusieurs milliers de kilomètres d'amplitude et se déplacent à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde, telle une houle énorme sur une mer magnétique.

Une faible partie du vent solaire a pénétré dans la magnétosphère. Sur ses flancs, des particules continuent de s'y écouler mais à travers elle, les effets du champ géomagnétique orienté du sud vers le nord, et du champ électrique orienté du côté matin vers le côté soir s'unissent pour influencer les particules chargées. Ils leur imposent un mouvement qui les conduit vers la Terre (voir figure 2.19). L'important est que ce mouvement imposé se fait de façon indépendante du signe de la charge (voir annexe 17) : toutes les particules, ions comme électrons, y sont contraintes. Elles le font dans le plan de l'équateur magnétique, mais sur une grande épaisseur : environ trois à sept rayons terrestres. On appelle cette zone le "feuillet de plasma" (figure 2.20). Du côté nuit de la Terre, sa frontière proche se trouve vers sept rayons terrestres. Loin dans l'espace, il rejoint la magnétopause à environ 100 à 200 rayons terrestres, distance parfois considérée comme le bout de la magnétosphère terrestre. L'énergie des ions du feuillet est typiquement de 2 à 5 kiloélectronvolts, et celle des électrons de 0,5 à 1 kiloélectronvolt. Le feuillet de plasma constitue la partie la plus dynamique de la magnétosphère. La densité moyenne dans le feuillet est de 3×10^5 à 5×10^5 particules par mètre cube, ce qui crée un contraste saisissant par rapport à son voisinage nord et sud : on ne trouve plus, hors de ce feuillet, qu'environ 1 000 ions par mètre cube. C'est la plus faible concentration de particules de l'environnement terrestre (le meilleur vide disent les physiciens).

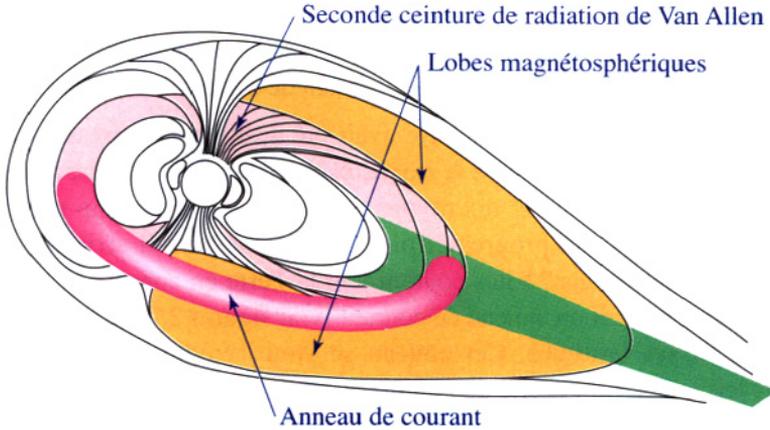


Figure 2.20 - Le feuillet de plasma et une ceinture de Van Allen

Nous avons représenté le feuillet de plasma en vert. Les zones en jaune sont appelées les lobes magnétosphériques, et constituent les régions de plus grand vide de l'environnement terrestre. Lorsque les particules du feuillet ne peuvent plus progresser vers la Terre parce que le champ magnétique est trop intense, elles la contournent en dessinant un anneau de courant. Des particules s'en échappent et remplissent la coquille rose, dite "seconde ceinture de radiations de Van Allen".

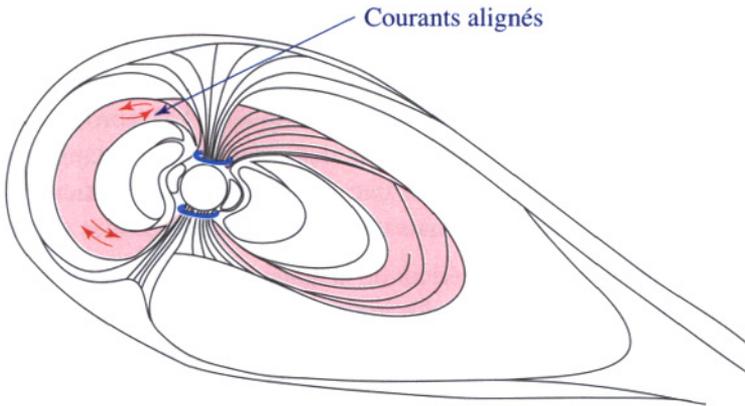


Figure 2.21 - Nous retrouvons la coquille rose de la figure 2.20

Les flèches représentent les courants alignés, mais elles peuvent aussi bien représenter le trajet d'ions ou d'électrons. Les pieds de la coquille dessinent dans la haute atmosphère terrestre deux ovals (ici en bleu foncé).

En s'approchant de notre planète, les particules chargées rencontrent un champ magnétique de plus en plus intense. Cette configuration rappelle celle déjà décrite, lorsque le vent solaire s'approchait de la Terre côté jour, après avoir été expulsé du Soleil. La différence majeure est que nous nous trouvons maintenant à l'intérieur de la magnétosphère, non en dehors. Les mêmes causes produisant les mêmes effets, l'intensification du champ produit, à l'intérieur même de la magnétosphère, une séparation de charges et donc, un courant. Ce dernier renforce le courant que nous

avons déjà décrit (voir figure 2.19), qui était dû à la seule présence du champ électrique. Le courant total résultant à la fois du champ électrique et de l'intensification du champ magnétique est appelé le "courant de traversée de queue".

De même que, côté jour, le vent solaire avait été arrêté par la pression du champ magnétique, les particules internes à la magnétosphère finissent par être arrêtées à leur tour, typiquement entre deux et dix rayons terrestres, par un champ magnétique si intense qu'elles ne peuvent progresser plus avant. Que peut-il arriver à ces populations d'ions et d'électrons ? Elles contournent la Terre en conservant une distance respectable et créent ainsi un anneau de courant (voir figures 2.20 et 2.21) qui entoure la Terre aux basses latitudes. Cet anneau se situe typiquement entre quatre et sept rayons terrestres. La densité de courant y est de l'ordre de 10^8 A m^{-2} , pour des particules dont 90% possèdent une énergie comprise entre 10 et 250 kiloélectronvolts. Son influence au niveau de la Terre se fait particulièrement sentir aux basses latitudes, vers l'équateur.

Ce mouvement d'encerclement de la Terre n'est cependant pas le seul que ces particules vont subir. Circulant à une distance grossièrement constante de la Terre, elles restent dans des zones de champ magnétique constant. Comme l'illustre la figure 2.20, on constate qu'elles demeurent confinées dans une coquille magnétique, c'est-à-dire dans un volume délimité par des lignes de champ fermées. Celles qui possèdent une vitesse initiale nord-sud, ou celles qui acquièrent une telle vitesse à la suite de collisions, spiralent autour de la ligne de champ locale et quittent l'anneau de courant pour explorer la coquille de champ magnétique. A l'approche de la Terre, la majeure partie de ces particules ricoche sur l'atmosphère¹⁵ et rebrousse chemin vers l'autre hémisphère, faisant inlassablement des allers-retours dans leur coquille magnétique. A un instant donné, seule une faible partie des particules trouve un passage dans l'atmosphère terrestre, mais tôt ou tard, chacune d'elles y pénétrera.

Ainsi la Terre est-elle cernée, à l'intérieur de la magnétosphère, par un volume peuplé de particules énergétiques effectuant des traversées du nord au sud et du sud au nord jusqu'à ce qu'au gré de collisions, elles puissent pénétrer dans l'atmosphère et y être absorbées. On a donné à cette zone de stockage de particules le nom de deuxième ceinture de Van Allen, du nom de son découvreur, ou encore ceinture externe de radiations (en rose sur les figures 2.20 et 2.21). Ceinture externe de radiations et anneau de courant sont donc deux manifestations des mêmes particules, arrivées du vent solaire dans la magnétosphère, et qui se rapprochent de la Terre dans le feuillet de plasma. Les anneaux que dessinent les pieds de la ceinture externe se trouvent aux

15 Rigoureusement, il s'agit d'une réflexion magnétique : le champ magnétique devient de plus en plus intense à l'approche de la Terre, et surtout de plus en plus dense : les lignes de champ se resserrent. Les particules ont tendance à ralentir, et même éventuellement à arrêter leur course vers la Terre, à des altitudes qui excèdent souvent plusieurs milliers de kilomètres. Ce point d'arrêt est le point miroir magnétique. La physique de ces phénomènes est exposée en annexe 17.

latitudes élevées, entre 65° et 75° nord ou sud, au-dessus de la Laponie, du pays Inuit, de la Terre de Baffin, Sibérie, Alaska, banquise de Ross, Terre Adélie... On les appelle les ovales auroraux. Ils sont représentés en bleu sur la figure 2.21.

Les particules qui circulent dans la ceinture de Van Allen sont également soumises au champ électrique qui traverse toute la magnétosphère. Sous son influence conjuguée à l'influence du champ magnétique, elles subissent le long de leur trajectoire des séparations de charges qui, une fois encore, génèrent des courants électriques. Comme ceux-ci se produisent le long des lignes de champ magnétiques, on les appelle les "courants alignés". Ils descendent jusqu'à quelques centaines de kilomètres dans l'atmosphère terrestre. Depuis l'espace interplanétaire, les particules du vent solaire ont traversé la magnétosphère puis sont revenues vers la Terre, générant sur leur passage divers courants : courants de magnétopause, de traversée de queue, annulaires, et à présent alignés. Ces derniers ne sont pas sans impact sur la haute atmosphère. Ils y engendrent des champs électriques qui, à leur tour, entraînent les ions et les électrons ionosphériques dans un système de convection qui par ricochet affecte la thermosphère au-dessus des calottes polaires.

Abandonnons un instant cette région pour porter notre attention sur d'autres zones de la magnétosphère, en deçà de la limite interne du feuillet de plasma, vers cinq à six rayons terrestres de la surface de la Terre, si proche d'elle qu'à toutes latitudes, l'atmosphère ténue est entraînée par la rotation de la planète ; on parle de "corotation". Cette zone, indiquée en bleu sur la figure 2.22, s'appelle la plasmasphère. La concentration y varie de 10 milliards de particules par mètre cube (10^{10} m^{-3}) au sommet de l'ionosphère, vers 1 000 kilomètres, à 100 millions (10^8 m^{-3}) sur sa frontière externe, la plasmopause. Tout de suite au-delà, dans la ceinture externe de radiations, la densité chute d'un facteur 10. Par contre, l'énergie des particules de la plasmasphère est plus faible que celle de la ceinture de radiations, en moyenne inférieure à 1 électronvolt.

A l'intérieur de la plasmasphère existe une autre ceinture de radiations : la première ceinture de Van Allen, ou ceinture interne. Elle se trouve dans une région compacte, centrée au-dessus de l'équateur, à une altitude de quelques milliers de kilomètres. Elle est distinguée en orange sur la figure 2.22. Son origine est très différente de tout ce qui fut décrit jusqu'alors. En effet, cette ceinture ne trouve pas sa source dans le vent solaire, mais principalement dans l'ionisation due aux rayons cosmiques. Malgré ce nom qui peut induire en erreur, le rayonnement cosmique est constitué de particules, et non de rayonnement électromagnétique. Il s'agit simplement du vent stellaire, provenant des autres étoiles que le Soleil. Comme elles sont très lointaines, le vent arrive sur Terre constitué d'électrons et d'ions très énergétiques, les autres ayant été absorbés près de l'étoile émettrice. Les énergies vont de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mégaelectronvolts. Comment ce vent stellaire donne-t-il naissance à une ceinture de radiations ? Le phénomène est le suivant : le vent stellaire, sous forme de particules (protons, électrons), est si énergétique qu'il pénètre sans difficulté dans la magnétosphère puis dans l'atmosphère, où il entre en collision avec les atomes d'oxy-

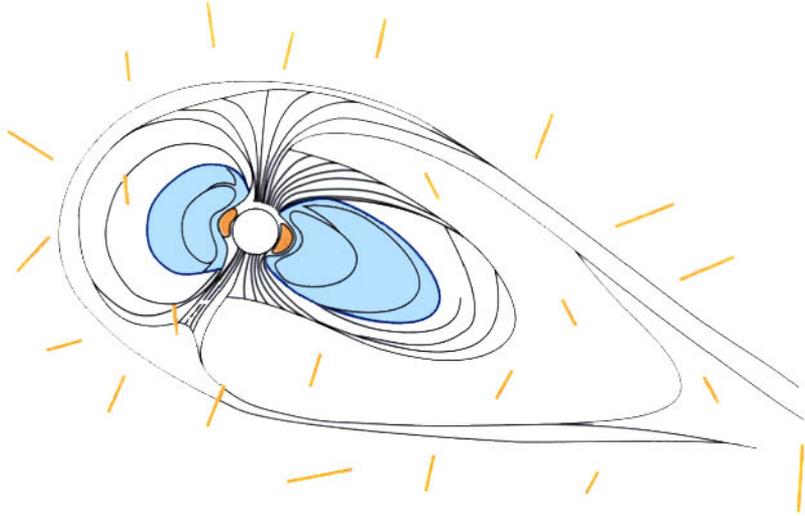


Figure 2.22 - Position de la plasmasphère, en bleu clair, et de la plasmopause, trait bleu foncé

La plasmasphère est entraînée par la rotation de la Terre. A l'intérieur de la plasmasphère, et également en corotation avec la Terre, la ceinture interne de radiations est identifiée en orange. Les traits jaunes symbolisent des particules dues au rayonnement cosmique (vent stellaire) qui se propage dans toutes les directions dans l'espace.

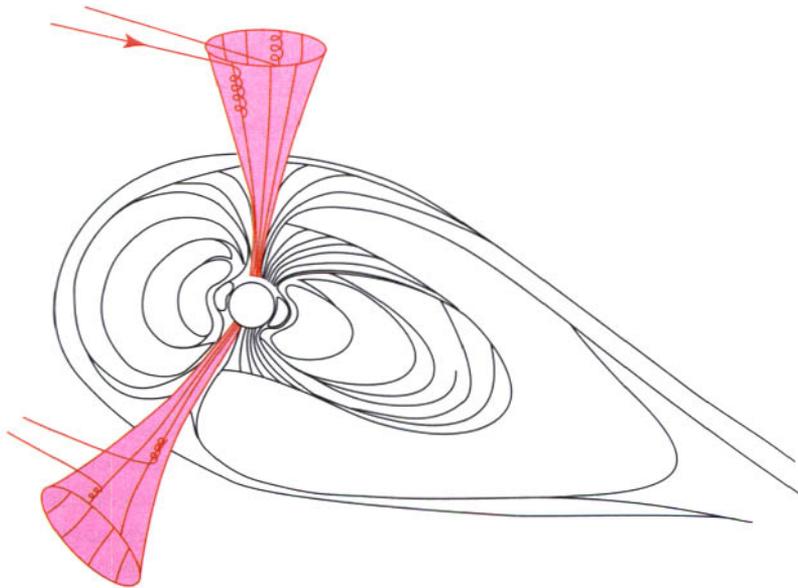


Figure 2.23 - Position des cornets polaires (en mauve)

Les flèches montrent les trajectoires de quatre particules du vent solaire piégées le long d'une ligne de champ des cornets. Elles peuvent alors être directement précipitées vers l'atmosphère polaire, ou être expulsées vers l'espace.

gène et d'azote pour produire des neutrons. Ces derniers sont insensibles au champ magnétique et s'échappent de la zone de collision avec des énergies élevées (supérieures à la dizaine de mégaelectronvolts). Toutefois, un neutron est instable avec une durée de vie limitée (de l'ordre de 15 minutes dans son repère propre) ; il se dissocie pour laisser la place à un proton et un électron. Les protons ainsi formés font des allers-retours du nord au sud et du sud au nord, le long de la ligne locale du champ magnétique terrestre jusqu'à être éventuellement absorbés dans l'atmosphère terrestre. La ceinture interne de radiations est le lieu de stockage de ces particules.

Un effet surprenant de l'activité solaire est d'influer sur le volume de la ceinture interne. Lorsque le Soleil est actif, il expulse des particules plus énergétiques et en plus grande abondance. Le flot qui longe la magnétopause devient alors plus dense, plus énergétique, et la probabilité de collision avec un rayon cosmique venu de l'espace croît sensiblement. Moins de rayons cosmiques traversent ce bouclier, et la ceinture interne de radiations s'en trouve amaigrie. On a donc constaté que la quantité de rayons cosmiques dans l'atmosphère¹⁶ et dans la magnétosphère est très bien anticorrélée avec le cycle solaire : lorsque le Soleil se calme, la quantité de rayonnement cosmique à l'intérieur de l'atmosphère terrestre augmente. La ceinture interne de radiations varie donc en fonction de l'activité solaire, mais à l'inverse de celle-ci.

Pour expliquer les perturbations de la magnétosphère dues au Soleil, il reste à présenter une région de notre environnement : les cornets polaires. Ceux-ci sont illustrés en mauve sur la figure 2.23. Ils se situent à très haute latitude. Là, le champ magnétique terrestre ne boucle plus sur la Terre : il s'ouvre sur l'espace en deux grands cornets, l'un au sud, l'autre au nord. Les particules solaires qui passent à proximité de leurs lignes de champ sont directement perturbées et peuvent se déposer dans l'atmosphère de notre planète. A l'inverse de leurs consœurs passées par le feuillet de plasma, elles n'ont pas subi de compression contre la magnétopause, pas d'accélération. Leur énergie est plus faible, et leurs effets sur l'atmosphère également moins intenses.

Se termine ici la description des principales régions magnétosphériques, celles du moins qui jouent un rôle majeur dans les relations Soleil-Terre. On peut maintenant expliquer l'effet géophysique le plus spectaculaire de l'interaction entre la magnétosphère et l'ionosphère : le phénomène d'aurore polaire.

¹⁶ La quantité de rayonnement cosmique décroît graduellement du sommet de l'atmosphère jusqu'à la surface terrestre, d'un facteur 1 000, comme l'a découvert, en 1936, le physicien PFOTZER à l'aide de détecteurs à bord de ballons-sondes. L'atmosphère constitue en effet un écran efficace. Lorsqu'elle est "attaquée", une cascade de particules est créée sous l'effet des collisions. Il s'agit de protons, neutrons, et d'autres particules plus exotiques telles des mésons. L'altitude à laquelle se produit le maximum d'ionisation est environ de 20 kilomètres... Une atmosphère à peine plus transparente ne saurait nous protéger aussi efficacement. Cependant, gardons en tête que le rayonnement cosmique est très peu abondant, et seuls quelques événements importants peuvent atteindre des altitudes si basses lors d'un cycle solaire.

4.2. LES AURORES POLAIRES

Le système de courants alignés (voir figure 2.21) peut être considéré sous son aspect purement particulière : des électrons et des ions qui ricochent sur l'atmosphère mais dont une partie importante arrive à y pénétrer. Ces particules subissent des collisions qui créent de l'excitation, de l'ionisation et du chauffage. S'y ajoutent des collisions élastiques, du type de celles des boules de billards, qui les font se transporter dans toute la haute atmosphère et parfois en ressortir. La limite basse, sous laquelle toutes les particules sont absorbées est à peu près la même que la limite d'absorption des ultraviolets extrêmes : de l'ordre de 80 kilomètres.

Ainsi atomes et molécules excités se désexcitent en émettant de la lumière. Du sol, on voit les magnifiques aurores polaires. De l'espace, les satellites voient un ovale lumineux, plus brillant côté nuit car les particules, en passant par le feuillet neutre, ont été accélérées (par des processus encore mal connus), et produisent des collisions plus violentes. Au nord, on l'appelle l'ovale auroral boréal, et au sud, l'ovale auroral austral.

L'ovale auroral était déjà bien connu au dix-neuvième siècle. Les géographes avaient déterminé sa position en observant attentivement les occurrences des aurores. Il en existe en permanence un au sud et un au nord de la Terre. Ils sont situés typiquement entre 65° et 75° de latitude magnétique.

Il restait à les expliquer scientifiquement. Au début du vingtième siècle, un jeune physicien norvégien du nom de BIRKELAND eut l'idée d'une simulation tout à fait extraordinaire. Il fit construire une grande enceinte vitrée dans laquelle il suspendit une sphère métallique. A l'intérieur de la sphère, nommée Terrella, il installa un électro-aimant. Dans le coin de la boîte, un canon à électrons était dirigé vers elle.

Puis il y fit le vide, c'est-à-dire celui qu'on était capable de faire à l'époque et qui, par hasard, correspondait assez bien à l'atmosphère à une centaine de kilomètres d'altitude. Tirant les électrons sur la sphère, il observa l'ovale auroral artificiel. Il venait de découvrir le mécanisme des aurores polaires !

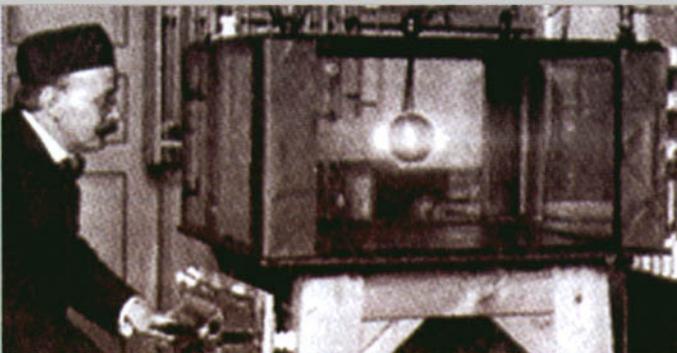


Figure 2.24 - BIRKELAND devant sa Terrella

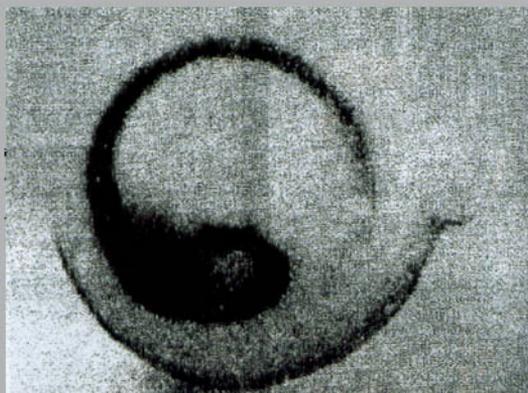


Figure 2.25 - Reconstitution de l'ovale auroral par BIRKELAND

Il présenta son expérience comme un effet inattendu des électrons récemment découverts par J.J. Thomson (en 1896). Malheureusement, il ne pouvait pas répondre aux questions telles que "Où sont les charges positives ? Où se trouve, entre la Terre et le Soleil, le conducteur dans lequel les électrons peuvent se déplacer ?". BIRKELAND fut ridiculisé, incompris, bientôt brisé moralement. Ce n'est que bien après sa mort (à Tokyo en 1912) qu'on réalisa l'avancée spectaculaire qu'il avait fait faire à la géophysique. En son hommage, les vents d'ions qui se propagent au pôle portent son nom, les courants de Birkeland : il avait eu l'intuition de leur origine dès 1903.

Voici ci-après une photographie de la Terrella telle qu'elle a été remontée par un ingénieur passionné d'histoire des sciences, Terje BRUNDTLAND. Il a retrouvé dans une cave d'Oslo les montants vermoulus originaux, le verre, les instruments poussiéreux. S'aidant de photographies d'époque, il a rénové, remonté, testé, et l'expérience fonctionne à nouveau à l'observatoire auroral de Tromsø, au nord de la Norvège.

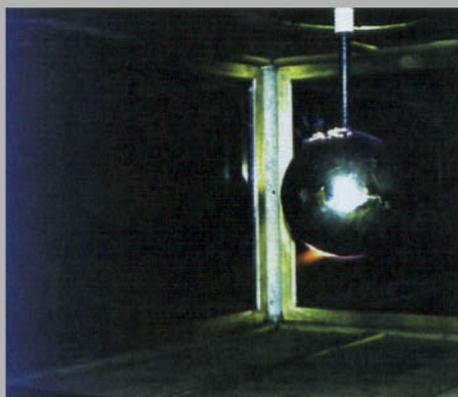


Figure 2.26 - La Terrella fonctionne de nouveau en Norvège !

L'existence de l'ovale auroral a été confirmée à partir des années 1950 par les premiers satellites. La photographie 2.27 a été prise en 1982 dans l'ultraviolet par le satellite Dynamics Explorer. On y distingue, en haut de l'image, la partie de la Terre éclairée par le Soleil. Le rayonnement est dû à la désexcitation des ions et neutres, excités par le rayonnement solaire UV. Le côté nuit de la Terre se trouve en bas de l'image. On distingue l'ovale auroral, avec une nette intensification locale (en jaune brillant) due à l'entrée de particules plus énergétiques dans l'atmosphère.



Figure 2.27 - L'ovale auroral se détache sur la Terre (crédit NASA/Dynamics Explorer)

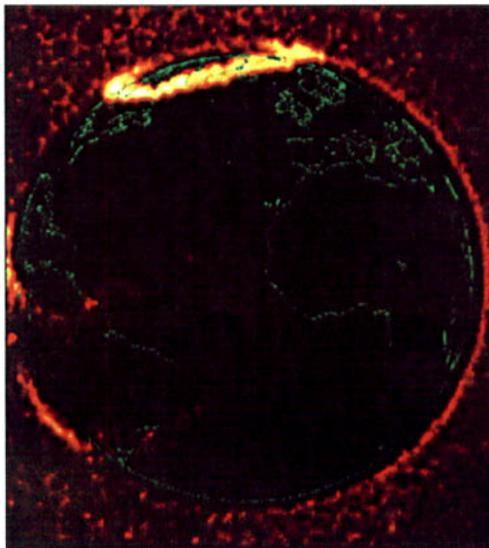


Figure 2.28 - La Terre couronnée (crédit NASA/Dynamics Explorer)

L'existence des ovales n'est pas liée à la partie de la magnétosphère qui tourne avec la Terre, et que nous avons appelée la plasmasphère : elle est directement en relation avec le feuillet de plasma, qui se trouve toujours côté nuit de la Terre. En conséquence, les ovales ne tournent pas avec la Terre, mais la Terre tourne en dessous d'eux. Ils sont présents de façon permanente, puisque le vent solaire souffle de façon permanente.

La photographie 2.28 montre la Terre couronnée, le 16 février 1982, par un cercle d'aurores, alors que Dynamics Explorer traversait le cône d'ombre de la Terre à une altitude de 3 à 3,17 rayons terrestres. Des aurores polaires actives sont observées au-dessus des régions polaires, et croissent au-dessus du limbe aussi bien le matin que le soir. L'ovale sud, symétrique, n'est pas visible sur cette image. Tout autour de la Terre, on distingue l'émission atmosphérique due au rayonnement terrestre.

Sur la Terre, sous l'ovale, si le ciel est dégagé, on voit des aurores polaires, boréales au nord, australes au sud.

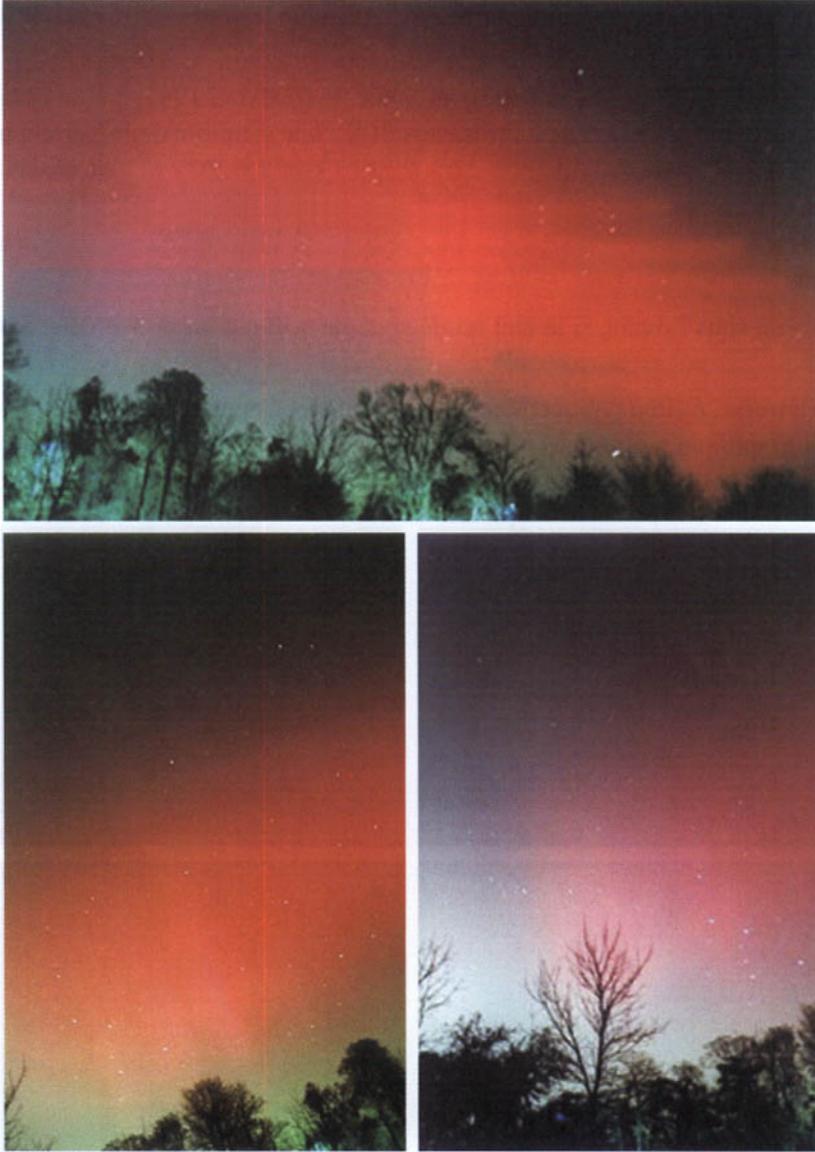
L'ovale auroral se situe typiquement à haute latitude. Cependant, l'axe magnétique et l'axe géographique ne sont pas tout à fait alignés, et comme le pôle nord magnétique se situe sur les territoires du Nord-Ouest du Canada, il est fréquent de voir des aurores



Figures 2.29 - Aurores boréales à Tromsø, en décembre 1999

Les étoiles qui se détachent derrière les rideaux auroraux témoignent de la faible luminosité des aurores. Sur la première photographie, les taches plus larges sont Jupiter et Saturne (crédit P. Volcke et J. Liliensten, Laboratoire de Planétologie de Grenoble. Détails techniques : support Fujichrome, 28 mm ouvert à 2.8, 400 ASA, filtre néant, poses de 40 à 70 secondes).

à des latitudes géographiques aussi basses que Québec, à 47 degrés de latitude géographique nord. A l'inverse, il est rare d'en admirer depuis Paris, qui se trouve pourtant sensiblement sur le même parallèle mais loin du pôle magnétique.



Figures 2.30 - Ces aurores polaires ont été prises depuis ... la Seine et Marne, en France !

Dans la nuit du 6 au 7 avril 2000, un orage magnétique (voir ci-après) élargissait l'ovale auroral jusqu'à des basses latitudes. On distingue la constellation de Cassiopée derrière l'aurore, sur les deux photographies du bas (crédit : G. Dubos, A. Leroy, T. Lambert, M. Besnier, et G. Laurent, Uranoscope de Seine et Marne. Détails techniques : 28 mm ouvert à 3.5, 400 ASA, poses de 1 à 3 minutes).

Les couleurs dépendent des éléments qui se désexcitent. Elles en constituent en quelque sorte la signature, ce qui permet une identification de la composition thermosphérique et ionosphérique à partir de l'analyse du spectre auroral : du bleu foncé, du pourpre, et du bleu émeraude pour l'ion azote moléculaire, du vert et du blanc pour la molécule d'azote, du jaune pour l'oxygène moléculaire, du vert et du rouge pour l'oxygène atomique... Le rayonnement visible de l'aurore n'est qu'une partie du rayonnement global : certaines émissions se produisent dans l'ultraviolet.

La dynamique de l'ovale auroral constitue à elle seule un pan entier de la recherche ionosphérique et thermosphérique. La photographie 2.31 en donne une idée. Ici, la face diurne de la Terre se trouve en haut à droite, et l'ovale est visible dans sa presque totalité. Les lumières des villes américaines dessinent le contour du continent, 80 kilomètres plus bas. Les larges tourbillons auroraux s'assimilent à ceux qui naissent dans une rivière au passage d'un obstacle tel qu'une pile de pont, ou à des volutes de fumées. Le caractère de ces instabilités est fondamentalement fluide.

Les aurores polaires ont été la source de très nombreuses croyances des peuples des hautes latitudes. Il y a peu, aux îles Lofoten, on interdisait aux enfants d'agiter un linge blanc tel qu'un mouchoir devant une aurore, de crainte que celle-ci ne vienne les capturer pour les emmener dans le ciel. A l'autre bout de la Terre, les Kurnais australiens frappaient l'aurore avec une "main morte", prise sur un proche décédé.

La première tentative d'interprétation scientifique date du philosophe grec ANAXIMÈNE, vers 600 avant J.-C. Il suggéra que l'air s'élevant de la Terre se condense pour former des nuages puis, plus haut, se raréfie et brûle pour donner les aurores. Cette interprétation, faiblement modifiée, subsistera jusqu'au dix-septième siècle. A la fin du dix-neuvième siècle, les connaissances se sont un peu améliorées. Camille FLAMMARION, dans son *Astronomie populaire* (éd. Flammarion), peut ainsi écrire en 1891 : "Le magnétisme terrestre a ses pôles, ses méridiens, son équateur, qui se déplacent sur et dans notre globe. Notre planète est en réalité un vaste aimant d'une puissance énorme, que GAUSS a évaluée à celle de 8 464 trillions de barres d'acier pesant chacune une livre et aimantées à saturation."

Citant alors les observations de CARRINGTON, il conclut :

"Il est très probable, presque certain, que cette correspondance entre l'état du Soleil et le magnétisme terrestre n'est pas fortuite mais réelle, et qu'il y a un rapport magnétique entre le Soleil et la Terre.

Cette correspondance paraît s'étendre aux aurores boréales... Le nombre et la grandeur des aurores visibles chaque année varie sur une période de onze ans, le maximum coïncidant avec celui des taches et des éruptions solaires... On se souvient qu'autrefois, ARAGO se vantait de deviner une aurore visible en Suède et en Norvège par la seule inspection de l'aiguille aimantée à Paris. Il n'est donc pas surprenant que la correspondance remarquée entre l'état du Soleil et la boussole s'étende aux aurores."

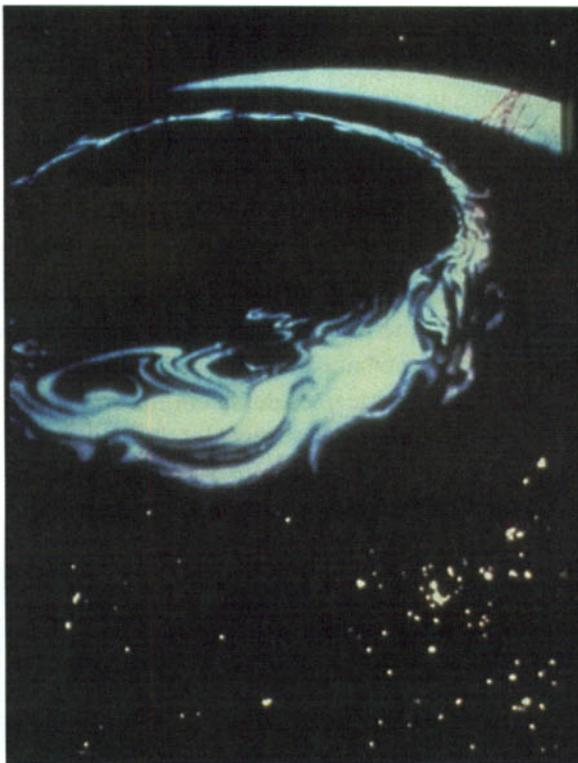


Figure 2.31 - Sous l'ovale auroral à la dynamique spectaculaire, les lumières tracent le contour des Etats-Unis d'Amérique (crédit DMSP, satellite de la Défense américaine)

4.3. LES ORAGES ET SOUS-ORAGES MAGNÉTIQUES

A l'échelle de toute la planète, un phénomène qui se répète plusieurs fois par an, l'orage magnétique, provoque d'importantes perturbations. De quoi s'agit-il ?

Le champ magnétique de la Terre est dirigé du sud au nord. Le vent solaire est constitué de particules chargées en mouvement, transportant leur propre champ magnétique. Lorsque la composante nord-sud du champ interplanétaire possède la même direction que celle du champ terrestre (c'est-à-dire du sud au nord), les interactions entre le vent solaire et le champ géomagnétique se déroulent comme nous les avons décrites précédemment, et forment la magnétosphère telle qu'elle est représentée sur la figure 2.15. Cependant, il arrive souvent que le champ interplanétaire se retourne, au gré des taches ou lors d'éjection de masse coronale. Du vent solaire rapide rattrape du vent solaire lent, des zones de compression apparaissent (les nuages magnétiques) qui perturbent la direction du champ magnétique. Lorsque l'activité solaire est grande, la direction du champ interplanétaire peut varier rapidement. Lorsqu'il s'inverse, du nord vers le sud, une sorte de neutralisation du champ géomagnétique s'opère. Les particules qui s'approchent de la Terre peuvent alors entrer directement dans la magné-

tosphère. Notre planète cesse d'être protégée par son champ, et reçoit de plein fouet un bombardement de protons. La magnétopause peut reculer de plus d'un rayon terrestre vers la Terre. Il arrive même qu'elle s'en approche plus près que l'orbite des satellites géostationnaires (6,6 rayons terrestres), les exposant directement au bombardement du vent solaire. Tant que les effets se cantonnent aux hautes latitudes, il s'agit d'un "sous-orage magnétique". Mais si les champs électriques ou les perturbations du champ magnétique sont sensibles jusqu'à basse latitude, le phénomène porte le nom d'"orage magnétique". Lorsque cela se produit, l'ovale auroral se voit agrémenté d'une barre transversale, lui donnant l'apparence de la lettre grecque Théta. Mais les effets ne se cantonnent pas à cela.

Les particules qui n'ont pas trouvé de point d'entrée côté jour contournent la Terre, comme décrit dans le paragraphe qui montrait la création de la magnétosphère. Mais des différences apparaissent : la magnétopause, cette carapace à l'intérieur de laquelle l'espace est soumis au champ magnétique terrestre, est plus poreuse pour les particules. Elles la traversent plus facilement : c'est la phase de croissance du sous-orage.

Puis, sous l'effet de forces dont l'origine n'est pas encore bien comprise, ces particules énergétiques sont précipitées vers la Terre par bouffées caractéristiques d'une minute. Ce phénomène de précipitations de particules peut durer plus d'une heure. Le courant électrique dans la magnétosphère s'intensifie, si bien que la plasmopause (la frontière qui sépare la partie de la magnétosphère en corotation avec la Terre de celle qui est toujours côté nuit de la Terre) descend jusqu'à deux ou trois rayons terrestres. Les électrons arrivent sur la Terre par le côté nuit à haute latitude, générant des aurores polaires très lumineuses, et s'étendent vers le nord, l'est et l'ouest en quelques dizaines de minutes. C'est la phase dite d'expansion du sous-orage, qui constitue une libération explosive de l'énergie stockée. L'énergie dissipée dans l'ionosphère des hautes latitudes peut brusquement atteindre 50 000 milliards de watts.

Les orages magnétiques sont rares et sans doute plus complexes encore que les sous-orages. Ils se développent en une demi-journée, et décroissent en quelques jours. Pendant un orage, on assiste également à une augmentation du courant annulaire. Entre 10 et 23 rayons terrestres, le feuillet de plasma se peuple, pour 40% de sa population ionique, d'ions oxygène arrachés à l'ionosphère terrestre.

Le plasma magnétosphérique rayonne faiblement dans l'ultraviolet, ce qui permet d'en faire des images à partir de satellites. La figure 2.33 montre sa forme sur une large échelle pendant un orage magnétique, le 11 août 2000 vers 18 heures TU. Le système complexe de courants accentué par l'orage, ainsi que les régimes différents de corotation ou de convection lui donnent une structure très particulière. On voit, en effet, une queue en forme de crochet se détacher vers le Soleil. La plasmasphère devient très irrégulière, et l'énergie du plasma s'intensifie côté nuit. A l'heure actuelle, ces manifestations sont très mal comprises, ce qui rend leur prévision difficile.

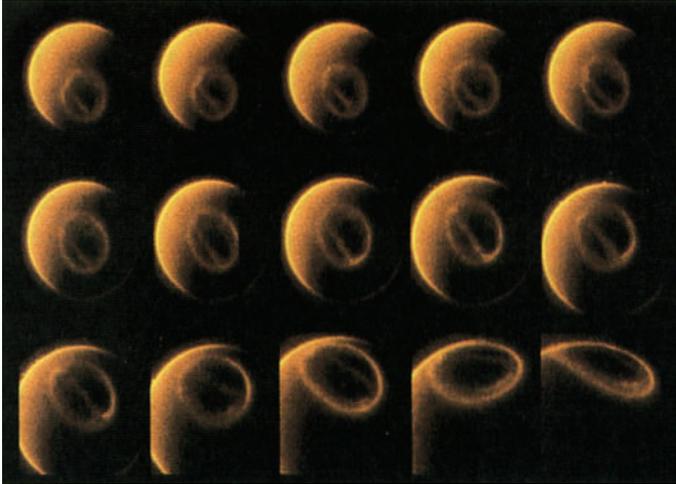


Figure 2.32 - Sur cette photographie de Dynamics Explorer, on voit une séquence de croissance puis de décroissance d'un arc Théta, le 8 novembre 1981, commençant à 14:12 TU et terminant à 17:02 TU. L'apparent grossissement de la Terre vient de l'orbite du satellite qui s'en rapproche (crédit NASA).

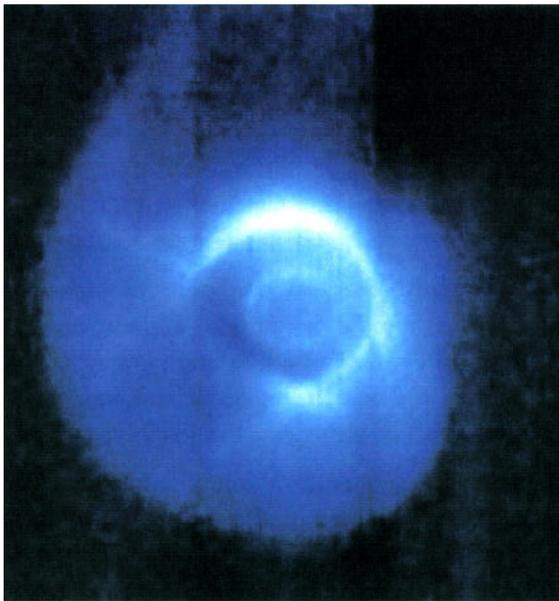


Figure 2.33 - Photographie (en fausses couleurs) de l'environnement de plasma de la Terre lors d'un orage magnétique. Le satellite survole la Terre au-dessus du pôle Nord. On distingue nettement l'ovale auroral dont le rayonnement est intensifié. La sphère plus blanche représente la position et la taille de la Terre. Le Soleil se trouve vers le coin en haut à droite de l'image (crédit NASA, Groupe scientifique du satellite IMAGE).

4.4. LES ÉCLAIRS DES HAUTES ALTITUDES

Une dernière et très récente découverte mérite qu'on y prête attention, car elle pourrait être amenée à changer quelques-unes de nos approches de l'environnement spatial. Nous avons précédemment décrit les précipitations de particules, qui sont une forme d'échange entre la magnétosphère et la thermosphère. Le vent polaire est un échappement de matière atmosphérique vers la magnétosphère. Ainsi, les différentes couches de notre environnement terrestre sont liées les unes aux autres, échangeant des particules ou de l'énergie. Or, il y a peu ¹⁷ a été découvert un processus qui lie directement la basse atmosphère à l'ionosphère.

Il s'agit d'éclairs rouges ou bleus qui, à l'inverse des éclairs classiques, sont dirigés du dessus du nuage vers la très haute atmosphère, vers l'ionosphère. Les éclairs rouges sont appelés des "sprites" ce qui, en français, peut se traduire par "farfadets" (on pourrait risquer le mot "farfadair"), et les seconds des "jets bleus".

Leur découverte confirma que bien des choses restent ignorées, peut-être juste sous nos yeux, et que la nature ne se laisse pas facilement découper en tranches, comme nous l'avons osé dans ce chapitre. Les éclairs, en effet, sont des canaux ionisés dans

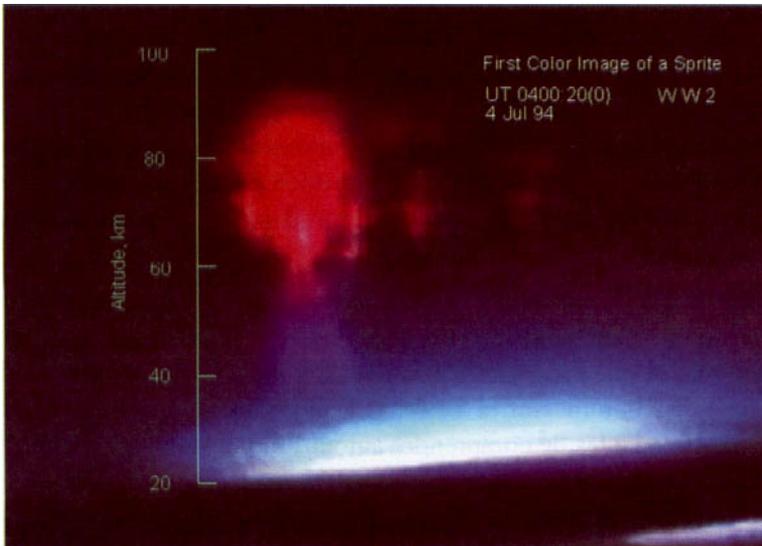


Figure 2.34 - Cette photographie est la première en couleur des "farfadairs" rouges, le 4 juillet 1994 (crédit Université d'Alaska, Institut de Géophysique)

17 En 1989, des chercheurs de l'Institut Géophysique d'Alaska (R.D. FRANZ, R.J. NEMZEK et J.R. WINCKLER) s'amusaient à entrer dans les cumulus d'orage avec de petits avions. En partie pour leur travail, en partie par défi. Ces nuages sont de véritables traquenards pour les avions, avec des vents qui les soulèvent comme des fétus de paille, des éclairs qui zèbrent en permanence. Or, la physique atmosphérique et la météorologie exigent d'en comprendre la formation et, pour cela, rien de tel que des mesures *in situ*.



Figure 2.35 - Les “farfadairs” peuvent parfois éclater en feux d’artifice !
(crédit Université d’Alaska, Institut de Géophysique)

lesquels l’énergie électrique se décharge, lorsqu’il existe une trop grande différence de potentiel. Ces “farfadairs” ou ces jets bleus n’avaient pas été imaginés parce que vers 110 kilomètres l’ionosphère est si conductrice qu’il est difficile d’imposer une grande différence de potentiel électrique. Mais ces éclairs d’un type nouveau viennent remplir d’ions les couches allant de quelques centaines de mètres à 90 kilomètres. Ces ions sont une source encore mal évaluée d’ionosphère, nocturne aussi bien que diurne, et étendue à l’ensemble de la planète. Ces phénomènes pourraient être corrélés à d’autres mal compris comme la position changeante de la magnétosphère. Ils pourraient également contribuer à donner une explication convaincante à l’existence d’une ionosphère nocturne (alors qu’il n’y a plus de source d’ionisation par rayonnement solaire), qu’on observe même à des latitudes trop basses pour qu’il existe des précipitations de particules du vent solaire.

Notre planète, la Terre, subit donc les feux du Soleil, ses vents de particules et ses flux variables de rayonnements électromagnétiques¹⁸. Heureusement, l’atmosphère et le bouclier magnétique protègent la Terre et permettent la vie. Tout cela existait bien avant la venue de l’homme sur la Terre, et l’on pourrait penser que nous sommes seulement mieux capables de comprendre aujourd’hui les effets du Soleil. Toutefois deux questions se posent :

- ◆ L’activité humaine modifie-t-elle ce que l’on aurait tendance à appeler cet équilibre (relatif bien sûr) ?
- ◆ Le développement technologique basé sur l’utilisation de courants électriques de plus en plus faibles, de micro- et nanotechnologies sera-t-il longtemps possible dans ce contexte agité de particules et d’ondes électromagnétiques ?

Le dernier chapitre de *Sous les feux du Soleil* devrait permettre de nous forger une opinion.

¹⁸ Des indices magnétiques sont définis pour caractériser les phénomènes magnétiques. L’annexe 14 décrit la situation actuelle.

Chapitre 3

VERS UNE MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE



*Figure 3.1 - Lever de Soleil depuis l'espace
(crédit J.P. Haigneré, CNES, mission Perseus)*

A l'origine des découvertes concernant l'environnement ionisé de notre planète se trouvent diverses tentatives pour expliquer les aurores boréales. Les premières mesures magnétiques ont été faites par VON HUMBOLDT, en 1805. C'est lui qui parla pour la première fois d'orage magnétique pour caractériser les perturbations de ses mesures. Avec GAUSS, il put donner une interprétation du champ magnétique terrestre. La première observation d'une éruption solaire date de 1859. Elle est due à R. CARRINGTON, astronome anglais, qui note un orage magnétique avec des aurores jusqu'à moyenne latitude environ 18 heures plus tard. Coïncidence ou corrélation ? Il n'est pas encore possible de répondre.

Trente années plus tôt, le Danois Hans Christian ØRSTED avait remarqué que les fils électriques font dévier l'aiguille des aimants. L'inverse fut mis en évidence en 1831 par le Britannique Michael FARADAY : l'aimant peut générer à son tour un courant. Les lois de l'électromagnétisme qui en découlent, unifiées en 1868 par l'Écossais

James Clerk MAXWELL sont bientôt appliquées aux relations Soleil-Terre par BIRKELAND. Dans les années 1950, Sydney CHAPMAN a le mérite de compléter l'interprétation de BIRKELAND sur le lien entre les éruptions et les aurores, mais aussi de proposer un mécanisme de formation de l'ionosphère. Certaines de ses théories sont remises en cause et complétées par Hannes ALFVEN, Suédois décédé en 1995, qui obtient le prix Nobel en 1970¹.

Le grand essor de la géophysique externe date de 1958. A cette époque régnait la guerre froide qui pouvait dégénérer en guerre totale à tout instant. En France, la guerre d'Algérie conduisait au putsch des généraux et à l'avènement de la 5^e République.

Dans ce climat tendu, il n'était pas évident pour les scientifiques de blocs géopolitiques opposés de collaborer. OPPENHEIMER par exemple fut accusé de collusion avec les communistes. Dans le plus grand secret, des savants des deux bords se rencontrèrent, tout d'abord dans une ferme du village de Pugwash en Ecosse. Le mouvement qui s'anima et prit ce nom reçut le prix Nobel de la paix en 1998. C'est dans ce contexte que sous l'influence de James Van ALLEN et de Sydney CHAPMAN, la période s'étendant du 1^{er} juillet 1957 au 31 décembre 1958 fut déclarée Année Géophysique Internationale.

On appréhende mieux les progrès récents des connaissances exposées dans ce livre en lisant le compte rendu que Paul-Emile VICTOR établit de l'Année Géophysique Internationale :

"Grâce aux observations faites en particulier dans les régions polaires, l'Année Géophysique Internationale a pu dégager une nouvelle théorie sur les phénomènes magnétiques.

Le noyau central terrestre, très radioactif, solide et probablement composé de fer, serait entouré d'un noyau "extérieur" liquide n'excédant pas 7500 km de diamètre.

La nouvelle théorie suppose que le champ magnétique trouve son origine dans le noyau extérieur ; aux origines le métal "baratte" provoqua un léger courant électrique qui produisit un léger champ magnétique. Les particules de métal se mouvant dans ce champ provoquèrent à leur tour des courants nouveaux ; ceci aboutit au champ magnétique observé actuellement, que viendraient influencer et perturber la lune et surtout le soleil.

Notre champ magnétique ne capterait pas que les particules expédiées par le soleil ; il piégerait aussi les émissions de l'espace.

L'origine et le mécanisme des fameuses aurores polaires furent aussi longuement étudiés, ainsi que ceux de l'activité solaire qui influe tant sur notre vie terrestre."

(P.E. VICTOR, *L'Homme à la conquête des pôles*, Librairie Plon, 1962)

1 Partagé la même année avec le Français Louis Néel pour des travaux sur le magnétisme des solides.

Américains et Soviétiques se livrèrent à une course scientifique de prestige qui les amena chacun à transporter aux pôles des tonnes de matériel et des centaines de personnes. Les autres nations, France, Allemagne, Grande-Bretagne n'étant pas en reste, cette année de labeur permit de dégager une nouvelle théorie sur les phénomènes magnétiques. La physique montrait le chemin de la sagesse : les humains unissaient leurs connaissances pour mieux comprendre leur environnement.

L'aéronomie, branche de la géophysique qui décrit les phénomènes abordés dans le chapitre précédent, est donc une science relativement jeune. Les relations Soleil-Terre qu'elle s'attache à comprendre se sont déroulées de façon identique depuis plusieurs milliards d'années. Notre technologie, en revanche, a considérablement évolué. Nous utilisons à présent les mêmes vecteurs que le Soleil pour le transport de l'énergie : ondes électromagnétiques et particules. Cette énergie sert dans de nombreuses applications, électricité, communications, positionnement... En raison de cette similitude de nature physique, il existe une interaction grandissante de l'activité solaire avec la nôtre, et en conséquence, une nécessité de plus en plus forte voit le jour de prévoir avec précision l'intensité de l'activité solaire, et de quantifier son impact sur la société. Nous passons insensiblement de l'aéronomie, des relations Soleil-Terre, à une branche nouvelle de l'astrophysique : la météorologie de l'espace.

Quelle est donc l'influence de l'activité solaire sur notre activité humaine ?

1. CONSÉQUENCES DES AGRESSIONS SOLAIRES SUR L'ENVIRONNEMENT TECHNOLOGIQUE

1.1. LES PIPELINES

Selon certaines hypothèses, les perturbations magnétiques lors d'événements solaires peuvent affecter les pigeons ou faire s'échouer les cétacés. Mais s'agissant de la corrosion des pipelines, il ne s'agit plus d'hypothèses : les pipelines sont fabriqués à partir de mélanges de métaux parmi lesquels le fer est présent. En présence d'humidité, il est bien connu que celui-ci rouille. Il s'agit d'une réaction qui met en jeu des électrons arrachés au métal : l'oxydoréduction ².

Cette corrosion pourrait entraîner une tragédie écologique majeure si du pétrole se répandait par un trou de pipeline dans les paysages désertiques d'Alaska, ou si le feu prenait à l'ouverture accidentelle d'un point corrodé. Les pipelines sont donc hautement surveillés et protégés. Pour éviter que le fer ne perde ses électrons dans le sol, les pipelines sont couverts d'un matériau peu conducteur, et maintenus artificiellement

2 Une oxydation se traduit par une perte d'électrons, et une réduction par un gain d'électrons. Dans une réaction d'oxydoréduction, un oxydant fixe un ou des électrons fournis par le réducteur.



Figure 3.2 - Le pipeline d'Alaska

Le flot de pétrole qui coule à l'intérieur maintient sa température bien au-dessus de celle du sol. Ce dernier est composé d'un mélange de terre et de glace (c'est un permafrost). La glace risque alors de fondre, la terre de se transformer en boue, et le pipeline de s'y enfoncer. Pour éviter une telle catastrophe, il est nécessaire de ... refroidir le sol. C'est la fonction des petites tours de chaque côté du pipeline (crédit D. Lummerzheim, Institut Géophysique d'Alaska).

à un potentiel légèrement négatif par rapport à la Terre ($-0,85$ volts) ce qui empêche les électrons de migrer. Cependant, la corrosion est accrue par les courants électriques qui se propagent dans le sol lors des orages et sous-orages magnétiques : la différence de potentiel avec le sol peut devenir positive de plusieurs volts, entraînant un départ des électrons. Les hautes latitudes sont particulièrement exposées, et le pipeline qui traverse l'Alaska du nord au sud, ou le réseau de pipelines scandinaves subissent une corrosion accélérée, nécessitant une surveillance permanente dans des conditions souvent extrêmes.

Les interventions sur les pipelines sont chères. Cela n'est pas dû seulement à l'environnement difficile des hautes latitudes ou des déserts, mais aussi au fait qu'une interruption du débit est une opération longue, minutieuse. Quantifier de façon précise les courants induits par les sous-orages en permettrait une gestion plus rigoureuse et plus économe. Il ne s'agit donc pas, en l'occurrence, de prévoir, mais de surveiller l'activité solaire.

1.2. LE TRANSPORT DE L'ÉLECTRICITÉ

La fabrication et la distribution d'électricité peuvent être sévèrement affectées par l'activité solaire. En effet, le développement industriel a densifié et interconnecté les réseaux, créant de gigantesques antennes qui, à l'échelle d'un continent, constituent d'excellents inducteurs pour les courants ionosphériques. En particulier, lors d'orages magnétiques, les courants parasites se propagent jusqu'aux transformateurs avec une intensité qui peut dépasser les capacités de régulation et faire disjoncter le réseau.

Si ces courants induits sont hautement variables en intensité comme en direction, leurs variations temporelles sont relativement lentes au regard du courant alternatif : de l'ordre de quelques centaines ou milliers de secondes. Les transformateurs, eux, sont des appareils à courant alternatif exclusif : 50 hertz en Europe, 60 hertz en Amérique du Nord... Ils ne peuvent transformer les courants induits quasi continus qu'en chaleur. Aux Etats-Unis, en 1992, pendant un orage magnétique, on a relevé une augmentation de température des transformateurs de 60 °C à 175 °C. On cite également souvent l'orage magnétique de mars 1989, précédé quatre jours plus tôt par une éruption solaire.

Le 13 mars, en 90 secondes, cet orage causa brutalement la fonte d'un générateur de 9 500 mégawatts et de sept compensateurs électriques au Québec et aux Etats-Unis. La charge sur le reste du réseau fut telle que bientôt, l'ensemble fut hors d'état de fonctionner, coupant l'électricité à 6 millions d'abonnés pendant 9 heures. Le même événement surchauffa et détruisit un transformateur dans le New Jersey, aux Etats-Unis, dont le remplacement coûta plusieurs millions de dollars américains. Il ne s'agit pas en effet d'un de ces transformateurs que nous voyons sur le bord des routes, qui tiennent dans des petites guérites de quelques mètres carrés, mais des plus gros appareils électriques construits sur terre, dont chacun pèse plusieurs tonnes. Il ne suffit pas d'en avoir en remplacement : il faut également le transporter à des coûts



Figure 3.3 - Région active sur le Soleil, photographiée par le service de surveillance océanique et atmosphérique américain, à 15 heures 08 TU le 9 mars 1989

Cette zone est environ 54 fois plus grande que la Terre. Peu de temps après cette image, une éruption centrée sur ce groupe de taches se développe, et déverse dans l'espace des milliards de tonnes de particules (crédit NOAA-SESC).



Figure 3.4 - Ce transformateur de la centrale nucléaire de Delaware River, dans le New Jersey, a été endommagé par l'orage magnétique du 13 mars 1989. Il s'agit de l'un des trois grands transformateurs d'une unité totale de 1 200 MVA. Il coûte plus de 10 millions de dollars, et sa réparation peut prendre plus d'un an (crédit Compagnie électrique du Minnesota).

considérables. Ainsi, entre la rupture dans le New Jersey et le remplacement, le surcoût pour les consommateurs fut de 400 000 dollars par jour. On estime qu'un orage magnétique à peine plus violent dans le nord-est des Etats-Unis provoquerait une dépense de 3 à 6 milliards de dollars, du même ordre qu'un cyclone ou un tremblement de terre.

Le paramètre clé pour prévoir les courants géophysiques induits est le champ électrique à la surface de la Terre. Or, celui-ci est lié aux courants ionosphériques, en interactions avec la magnétosphère soumise aux perturbations solaires. Il est donc nécessaire de prévoir les variations dans toute la chaîne avec un délai d'au moins une dizaine de minutes. Pourquoi ce délai ? Parce qu'en permanence, des opérateurs humains suivent sur des appareils de contrôle la consommation d'électricité et ajustent la production à la demande. Les événements qui influent sur cette dernière sont nombreux : une baisse de 1 degré de la température extérieure moyenne engendre la mise en marche de radiateurs. Les seuls radiateurs électriques allumés impliquent la

mise sur le réseau de la production d'une centrale supplémentaire dans un pays de la taille de la France ou de la Grande-Bretagne. L'éclipse du Soleil d'août 1999, un passage de nuages, la fin d'une émission télévisée grand public sont autant d'événements qui entraînent l'intervention des opérateurs.

Les coûts d'une surproduction se chiffrent en millions d'Euros. Le coût d'une sous-production peut être plus grand encore, car les lignes électriques, trop sollicitées par les utilisateurs, peuvent se rompre. Une fausse alarme peut donc coûter très cher, et les opérateurs veulent les prévisions les plus justes. Dans le cas général, trouver la cause d'une alarme réelle et y répondre au mieux peut prendre quelques minutes, quelques minutes qui ont un coût. Pour les compagnies d'électricité, l'objectif à atteindre est simple, mais ne doit donc souffrir d'aucune fausse alarme : il s'agit de prévenir suffisamment tôt à quel endroit un courant géophysique induit va apparaître. Lorsque l'alarme survient sur le terminal de contrôle, l'opérateur sait immédiatement à quel type de phénomène il est confronté et peut choisir les bonnes décisions : baisser la tension des réseaux pour permettre une possible surcharge interplanétaire sans incident, inclure dans le circuit la production d'une ou plusieurs centrales supplémentaires non concernées par le courant induit, acheter du courant aux pays limitrophes...

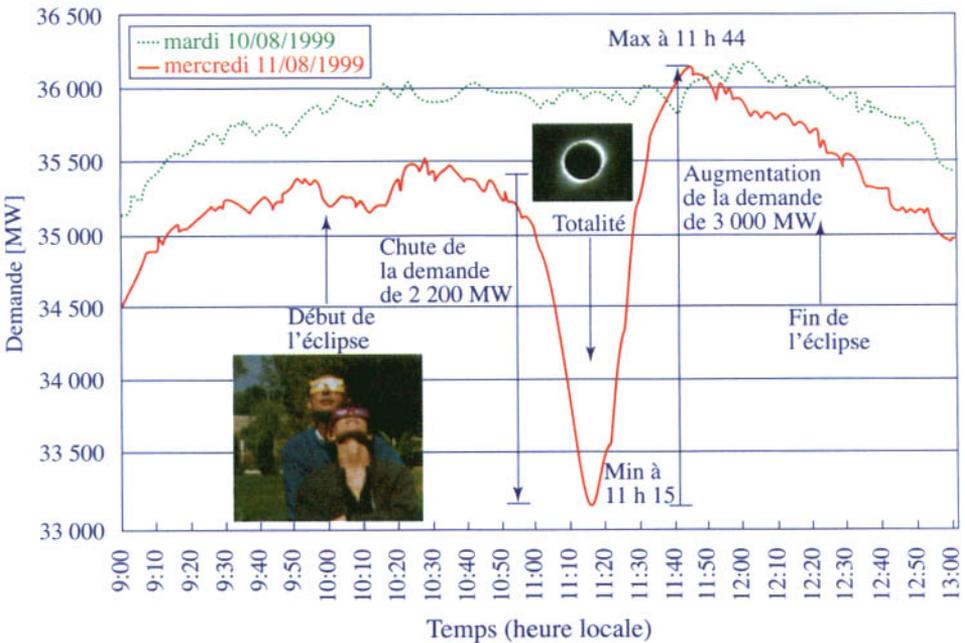


Figure 3.5 - Effet de l'éclipse totale de Soleil sur la demande d'électricité, en Grande-Bretagne, le 11 août 1999

Au moment où l'éclipse était véritablement totale, la consommation d'électricité a chuté de près de 2 500 mégawatts. Juste après la totalité, le retour à la maison et les nombreux appels téléphoniques l'ont fait monter au-dessus de sa valeur nominale (crédit National Grid Company inc).

1.3. LE CHEMIN DE FER

Les courants géophysiques induits peuvent – heureusement rarement – perturber les systèmes de signalisation, comme ce fut le cas probablement en Suède en 1982. La rareté du phénomène ne doit pas empêcher de s'en prémunir, car une catastrophe ferroviaire met en danger la vie de très nombreuses personnes. Le rayonnement cosmique, lui aussi, a probablement une influence sur les réseaux ferrés. Ainsi, on remarqua des chutes de puissance du train à grande vitesse allemand ICE dès son entrée en service en 1990. Ces incidents étaient irréguliers, mais on nota qu'ils n'arrivaient jamais pendant la traversée d'un tunnel. L'analyse détaillée a montré qu'il s'agissait de composants électroniques affectés par le rayonnement cosmique, l'effet de ce dernier étant amplifié par les champs électriques intenses des unités de contrôle de puissance du train.

1.4. LES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Il arrive que lors d'une communication téléphonique outre-Atlantique, votre correspondant se plaigne de vous entendre à peine tandis que sa voix vous parvient avec une forte puissance. Il vous demande de parler plus fort, et vous vous époumonez à lui demander d'arrêter de crier. Il s'agit une fois de plus de l'effet des courants géophysiques induits, qui agissent comme un amplificateur dans un sens et une résistance dans l'autre sur les courants qui circulent dans les câbles sous-marins qui traversent l'océan.

Quittons à présent le sol de notre planète et examinons comment et où se propagent les ondes que nous utilisons pour nos communications. Les grandes ondes (30-300 kilohertz) et les ondes moyennes (300-3 000 kilohertz) utilisées en navigation ou radio longent la Terre dans la basse ionosphère. Les ondes courtes ou haute fréquence (3-30 mégahertz) des radioamateurs, de la téléphonie mobile, de la radio FM, ou des fréquences taxi se réfléchissent sur l'ionosphère. Les ondes UHF ou VHF (en dessous de 3 gigahertz) utilisées pour le téléphone, la télévision ou la radio FM, traversent l'ionosphère en toutes conditions, mais subissent des atténuations et des changements de phase qui dépendent du contenu de la colonne d'électrons traversée.

Toute altération de la structure ionosphérique affecte donc la propagation de ces ondes. Comme l'ionosphère est très sensible au rayonnement et aux précipitations de particules chargées, elle peut être perturbée pendant quelques heures à la suite d'orages magnétosphériques et présenter de fortes irrégularités de structure qui produisent des phénomènes d'interférences et même d'absorption. Un volume d'atmosphère chauffé par une perturbation en zone aurorale peut se déplacer, en conservant ses caractéristiques de haute température et de concentration en une véritable bulle de plasma. Ces bulles de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres sont évidemment très ennuyeuses pour les télécommunications des basses latitudes, et sont très difficiles à prévoir.



Figure 3.6 - Oh, j'en pouvais plus ! j'avais tellement besoin de prendre quelques heures en montant dans ce bois, au-dessus du bruit, de la pollution. La semaine a été trop dure, après cette histoire de la fuite du pipeline la semaine dernière, ces spatio-nauts qui n'ont pu se protéger parce que les satellites d'alerte ont disfonctionné ; et, la même éruption solaire qui nous fait fondre des transfos ; d'ailleurs le quartier nord est toujours sans courant... Mais, j'y pense, j'ai oublié d'avertir Geneviève pour la sortie de l'école ! ... Oh, non ! c'est pas vrai ! le mobile qui ne marche pas ! encore un satellite foutu ! (C.J. colline de Pelemont, mars 2007)

Les systèmes de positionnement globaux³ peuvent également être perturbés. La première facette de ces systèmes est constituée d'une constellation de satellites en orbite à des altitudes de l'ordre de 20 000 kilomètres, répartis de telle façon que tout point du globe est en permanence visible de quatre d'entre eux au moins. Un aspect important d'un système de positionnement global est le procédé de réception au sol. Les satellites sont équipés d'horloges atomiques étalonnées entre elles. Ces horloges au césium offrent la meilleure précision possible actuellement sur la mesure du temps : une seconde de marge d'erreur sur un million d'années, à bord de satellites prévus pour durer environ sept à huit ans. La contrepartie de cette précision est leur poids élevé : les satellites de positionnement globaux pèsent plus de 800 kilogrammes.

Chaque satellite émet en permanence deux informations : sa position et l'heure exacte d'émission. Une station au sol reçoit cet ensemble depuis plusieurs émetteurs, et peut ainsi calculer sa distance entre elle-même et chacun des satellites. Avec ces informations, la station peut déduire sa propre position avec une précision de quelques mètres. L'exactitude de l'information sur la position des satellites eux-mêmes est déterminante. Pour la vérifier, des stations de suivi de satellites soigneusement réparties sur la planète transmettent les positions émises par les satellites à un centre opéra-

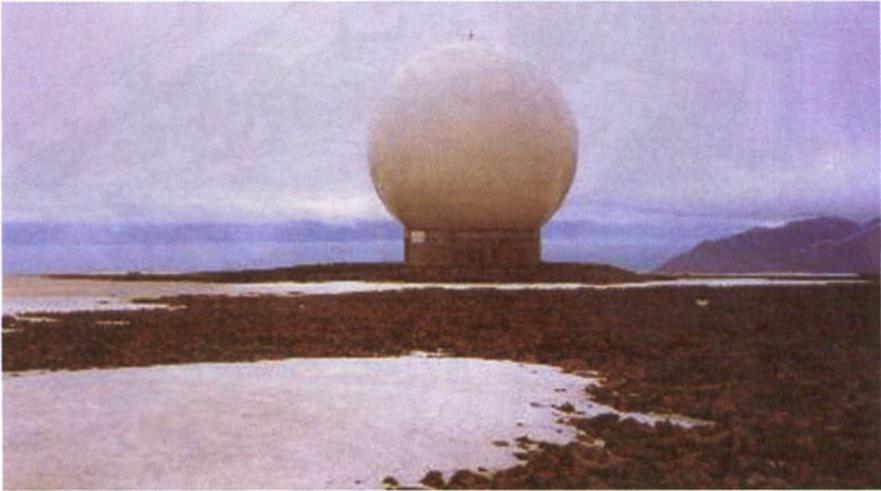


Figure 3.7 - Sur l'île de Svalbard, ce globe protège une antenne de suivi de satellites de la NASA

(crédit C. Lathuillère, Laboratoire de Planétologie de Grenoble)

3 Il en existe un créé par les Etats-Unis, le GPS qui comporte 24 satellites en six orbites différentes, à une altitude de 20 200 kilomètres, avec un centre opérationnel de contrôle dans le Colorado. Un second système créé par la Russie, GLONASS, possède également 24 satellites sur quatre orbites, à 19 000 kilomètres d'altitude. Le premier système est opérationnel depuis 1994, et le second depuis 1996. Celui de la communauté européenne, qui doit être opérationnel dans la première décennie du vingt et unième siècle, s'appelle Galileo, mais l'Europe dispose de stations de réception pour les deux systèmes américain et russe.

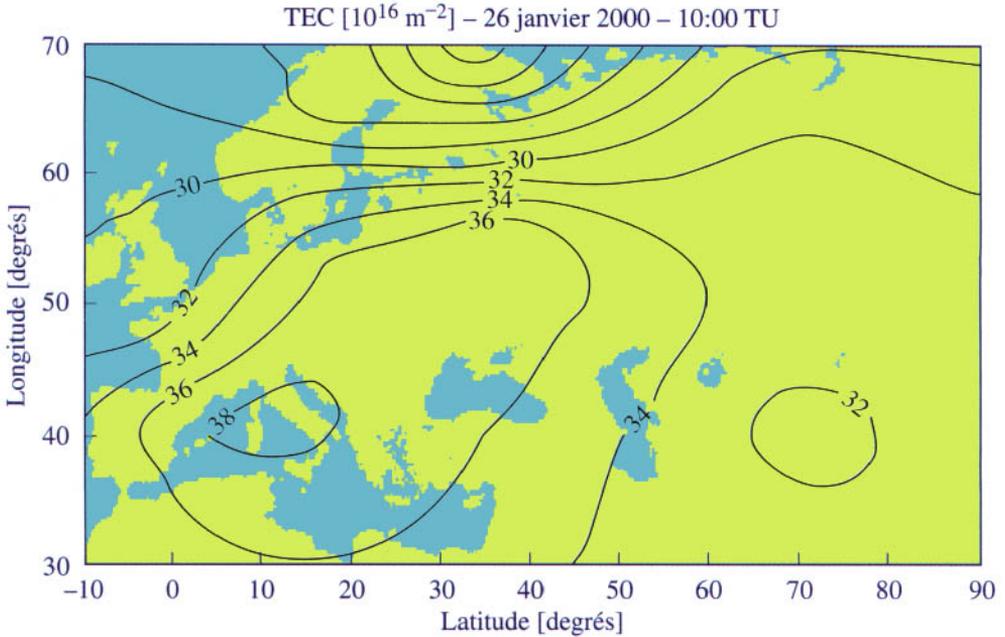


Figure 3.8 - Carte du contenu électronique total au-dessus de l'Europe, le 26 janvier 2000

Pour la rendre plus lisible, chaque nombre a été divisé par 10 millions de milliards (10^{16}). Ainsi, 38 sur la carte signifie qu'au-dessus de ce trait, sur une colonne de 1 mètre carré de section et depuis le sol jusqu'à 20000 kilomètres, il y a 38×10^{16} électrons dans l'ionosphère (crédit Royal Appleton Laboratory, Grande-Bretagne).

tionnel de contrôle. Celui-ci utilise les prévisions sur l'activité solaire, l'état de la magnétosphère et l'état de l'ionosphère par où transitent les ondes porteuses d'informations, prédit à son tour la position des satellites pour les prochaines 12 heures, et les transmet. La mise à jour est permanente.

Les utilisateurs de positionnement global sont de plus en plus nombreux : missiles militaires, avions, autres satellites, véhicules d'urgence, un nombre croissant de voitures grand tourisme, de navires... Les fréquences utilisées se situent dans la gamme du gigahertz. Une forte perturbation magnétique, qui entraîne des variations de la concentration électronique dans l'atmosphère, peut induire des erreurs de quelques dizaines de mètres à environ 1 kilomètre dans la détermination des positions. Ces erreurs peuvent se révéler dramatiques dans quelques cas pour des avions ou des navires.

Pour les éviter, il est possible de faire travailler les systèmes de positionnement avec deux fréquences au lieu d'une : les différences entre les deux mesures indépendantes permettent une correction très précise. Cependant, il s'agit d'une solution coûteuse, car elle accroît le poids des équipements embarqués à bord des satellites. Il faut donc avoir recours à la modélisation pour connaître précisément le contenu électronique de l'atmosphère en temps réel. Des cartes en sont publiées plusieurs fois par jour, sur lesquelles se basent les opérateurs en particulier spatiaux.

1.5. LE DÉCOLLAGE D'UN ENGIN SPATIAL

Considérons les risques d'incident lors du décollage d'un engin. Compte tenu de son prix, c'est le décollage d'une fusée qui fut le mieux analysé.

Comment se passe le lancement d'une fusée Ariane 5 ? Les opérations ont lieu à Kourou, en Guyane. Il faut 22 jours de vérifications, de mises au point. Les 13 premiers jours sont consacrés aux opérations d'assemblage des divers étages de la fusée, dans lesquels on stocke de la poudre, les équipements, les propergols. On procède à des contrôles électriques et d'étanchéité, et on prépare le transfert au bâtiment d'assemblage final. C'est là, au cours de la troisième semaine, qu'est installée la "charge utile", c'est-à-dire les satellites à mettre en orbite. Après une dernière inspection commence la phase de remplissage et de pressurisation, activité très dangereuse : à la moindre étincelle, tout peut s'embraser comme une torche. Le 22^e jour, la fusée est emmenée sur sa zone de lancement. Commence alors le compte à rebours, à 6 heures du décollage prévu, l'heure H0. Les derniers fluides, les plus dangereux, les ergols, sont versés à H0 moins 4 heures 30. L'armement mécanique de la rampe se fait à H0 moins une heure. 6 minutes 1/2 avant H0 commence la "séquence synchronisée". A H0 c'est le lancement, qui commence avec l'allumage du moteur de l'Etage Principal⁴. Si tout fonctionne correctement, les deux Etages d'Accélération à Poudre sont allumés à leur tour, permettant ainsi le décollage du lanceur. Ils sont très vite largués, à seulement 60 kilomètres d'altitude, et retombent dans la mer. L'étage principal est largué de telle sorte qu'il retombe dans l'océan Pacifique, à 1 200 kilomètres des côtes. Le ou les satellites sont ensuite mis en orbite. Tout cela n'a duré que 40 minutes.



Figure 3.9 - Centre de contrôle (ESOC) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), à Darmstadt en Allemagne

4 Les majuscules sont là car c'est souvent elles qui sont utilisées : EP, EAP...



Figure 3.10 - Lancement d'Ariane 5 de la base de Kourou (crédit Arianespace)

Il faut réduire les risques dans toutes les étapes du lancement : un à deux jours avant, lors de la mise en place sur le pas de tir ; au début du remplissage ; et enfin lors du démarrage de la séquence synchronisée, automatique. Les risques de panne liés à l'environnement spatial sont une défaillance des télécommunications et l'endommagement de composants électroniques de la fusée sous l'effet de radiations intenses. D'après les calculs de la direction des lanceurs du CNES, la probabilité d'échec d'Ariane 5 dû à cette source peut être de un pour cent lors d'une éruption solaire très violente. Hors éruption, elle est de un pour mille. Il faut donc être certain qu'il n'y a pas de perturbation géophysique de l'environnement.

1.6. LE VOL DES SATELLITES

Les orbites de satellites sont des ellipses ⁵ qu'on caractérise par la distance la plus proche à laquelle ils s'approchent de la Terre ⁶ – le périégée – ou la plus lointaine – l'apogée –. Un autre paramètre important est l'inclinaison, c'est-à-dire l'angle que l'orbite fait avec l'équateur : une inclinaison de 0 degré correspond à un satellite en orbite équatoriale, tandis que 90° est une orbite purement polaire ⁷. Selon l'altitude

5 La loi des aires, qui permet de traiter les orbites des planètes (voir en annexe 12), est également applicable pour celles des satellites artificiels.

6 Pour un autre corps que la Terre, on parle de périastre et d'apoastre.

7 L'annexe 21 donne quelques détails sur les paramètres orbitaux des satellites.

de vol, on parle également d'orbite basse (vers 1 000 kilomètres), moyenne (vers 10 000 kilomètres) ou haute : dans ce cas, il s'agit de l'orbite géostationnaire, là où les satellites équatoriaux tournent avec la même vitesse angulaire que la Terre, de telle sorte qu'ils en survolent toujours le même point. Leur distance fixe au-dessus du sol est proche de 36 000 kilomètres.

On peut imaginer de nombreux autres types d'orbites, depuis celles qui survolent toujours les deux mêmes heures locales (une de nuit, une de jour) à celles qui, synchronisées sur le Soleil (ou "héliosynchrone"), voient la Terre tourner sous le satellite.

L'électronique des satellites joue un rôle déterminant pour le contrôle de l'orbite et de la position du satellite : doit-il faire face à la Terre ? Avec un angle particulier ? Doit-il se pointer vers le Soleil ? Vers une étoile ? C'est le contrôle d'attitude.

Les risques de détérioration des satellites augmentent avec le temps passé dans l'espace. Les satellites moins inclinés que $51,6^\circ$, et dont un apogée est compris entre un et huit rayons terrestres traversent une ou deux ceintures de radiations à chaque rotation. Celles-ci possèdent de fortes concentrations en particules énergétiques, et exposent les satellites à leur bombardement. Si l'inclinaison des satellites est plus élevée que 80° , ils passent de surcroît dans les cornets polaires, où ils sont soumis à l'influence directe du vent solaire.

Les dégradations qu'ils y subissent furent très rapidement prises en compte. On s'aperçut qu'en traversant le plasma magnétosphérique, des différences de potentiel apparaissaient à bord, entraînant des décharges électriques, endommageant les instruments. Dans d'autres cas, des particules de forte énergie s'accumulent dans certaines parties du satellite, générant le même effet. On tente de résoudre ce problème en utilisant des matériaux moins conducteurs, en particulier pour les tuiles thermiques à l'extérieur des engins spatiaux. Le problème existe aussi pour les câbles, et surtout pour la micro-électronique embarquée, qui est très sensible à la moindre décharge électrique en raison même de la miniaturisation.

Des électrons pénètrent dans le blindage satellitaire, ionisent en cascade ce qu'ils rencontrent et créent du rayonnement X. Un élément binaire de mémoire ou de processeur peut basculer d'un état à l'autre sous l'effet d'un ion lourd issu du Soleil, ou de l'ionisation secondaire à bord (c'est-à-dire des ions et des électrons créés par collisions d'ions solaires légers ou du rayonnement). "Basculer" signifie ici transformer zéro en un ou vice versa. Cela peut paraître peu, mais on comprend que lorsqu'il s'agit par exemple du 1 de 10 000 000 000, la différence peut s'avérer énorme. Il s'agit dans ce cas de ce que les spécialistes appellent "l'effet d'un événement unique", qui peut également être créé par du rayonnement cosmique très énergétique, et par conséquent hautement ionisant. La conséquence peut être la rupture d'un composant diélectrique.

Qualifié de "premier satellite pour l'écologie", ERS-1 (European Remote Sensing) de l'Agence Spatiale Européenne fut lancé par Ariane en mars 1991. Pour 1 milliard de dollars, 2,4 tonnes, et près de 12 mètres de diamètre, il emportait à bord une large

panoplie d'instruments consacrés à l'observation, sur toute la surface du globe, des anomalies climatiques, du niveau des mers, de la dynamique des courants marins. ERS-1 fut placé sur une orbite circulaire héliosynchrone quasipolaire, d'une altitude moyenne de 780 kilomètres. L'heure solaire moyenne locale de passage au-dessus de l'équateur dans le sens nord-sud était 10 heures 30. Entre les radars, altimètre, laser et radiomètre se trouvait un équipement de mesure de vitesse et de distance, dont le rôle était la détermination précise de la position du satellite et de son orbite pour la localisation géodésique des stations sol, l'instrument PRARE. C'est ce dernier qui fut la victime d'un évènement unique qui causa sa perte, et rendit beaucoup plus ardue la détermination de la position du satellite et partant, celle des mesures effectuées⁸.

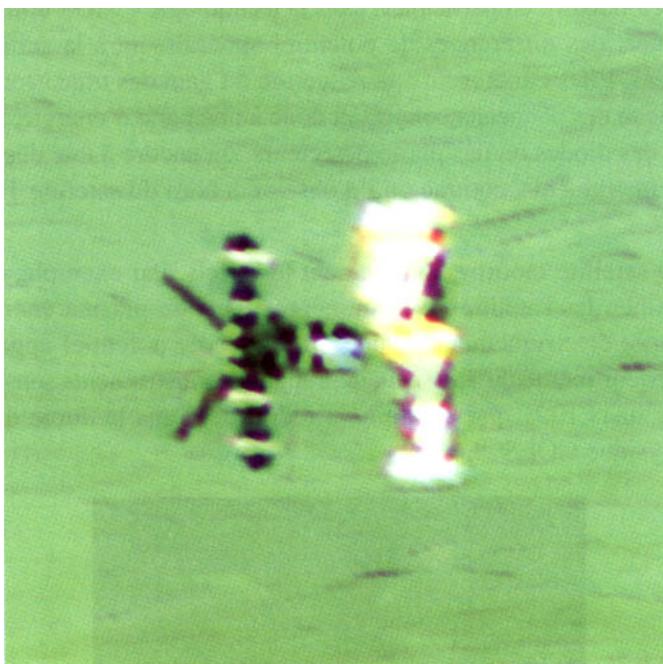


Figure 3.11 - ERS-1 vu par SPOT-4

Le satellite ERS-1 est un satellite d'observation dont on distingue, à droite de l'image, la plate-forme et le panneau solaire et, à gauche, la longue antenne rectangulaire de 10 mètres \times 1 mètre du radar à synthèse d'ouverture, ainsi que deux antennes plus courtes et plus étroites (3,6 mètres \times 0,25 mètre), inclinées à 45°, destinées à la mesure du champ de vent. Les zones très brillantes sur l'image sont dues à la réflexion du Soleil sur les revêtements très réfléchissants qui protègent le satellite. ERS-1 parcourt une orbite qui passe 41 kilomètres sous celle du satellite SPOT. Cette proximité permet à SPOT-4 de distinguer sur ERS-1 des détails de 50 centimètres. En revanche, volant plus bas, ERS-1 est plus rapide et double SPOT-4 à la vitesse relative d'environ 250 kilomètres par heure (crédit CNES).

⁸ ERS-1 a cessé de fonctionner le 10 mars 2000, après une panne de son contrôle d'attitude. ERS-2, lancé le 21 avril 1995, a pris le relais d'ERS-1.

De l'avis unanime, ces évènements dits uniques sont destinés à devenir le souci majeur des constructeurs de satellites au cours des prochaines années. En dépit de leur nom, ces événements peuvent se succéder à haute cadence ! On en a observé jusqu'à vingt par jour à la suite d'une éruption solaire en octobre 1989, à bord d'un satellite relais de la NASA (TDRS-1), ce qui a fortement dégradé son contrôle d'attitude. Il fallut mettre en place des procédures au sol fort coûteuses pour le maintenir sur son orbite. Dans ces situations, les ordinateurs portables commerciaux sont très sensibles aux ionisations parasites. A bord de la station MIR, ils pouvaient connaître des interruptions accidentelles toutes les heures !

Dans certaines circonstances, on peut se protéger d'une seule particule. Mais leur effet peut être cumulatif : en particulier, dans la technologie CMOS utilisée en électronique embarquée, des différences de potentiel apparaissent à la suite de plusieurs attaques répétées. Elles conduisent à la réduction du gain des transistors, à une diminution d'efficacité des panneaux solaires et donc à une perte d'énergie, à des lumières parasites dans des diodes ou des photo détecteurs, ou encore à une dégradation de la résolution des instruments, comme on l'a observé à bord du satellite TOPEX⁹ lancé le 10 août 1992.

La position du satellite modifie notablement les effets. Par exemple, dans la queue magnétosphérique, les satellites sont immergés dans un plasma énergétique. Leur surface se charge électriquement, et une différence de potentiel apparaît, une fois encore, à l'intérieur même du vaisseau, dégradant des instruments sensibles. L'orage magnétique de mars 1991, par exemple, a réduit de 3 ans la durée d'opération du satellite géophysique GOES¹⁰.



Figure 3.12 - Vue d'artiste du satellite TOPEX-POSEIDON (crédit CNES-NASA)

-
- 9 La mission Topex-Poséidon, la plus importante des collaborations CNES/NASA, est destinée à mieux comprendre le rôle des océans dans les variations climatiques. Le satellite effectue des relevés précis et répétitifs du niveau des mers, des courants marins et de leurs effets sur les changements climatiques globaux. Les mesures altimétriques permettent aux scientifiques d'étudier les marées, les vagues, la géophysique et les vents marins.
- 10 Or ce – ou plutôt *ces* – satellites sont la base du système de surveillance et de prévision météorologique des Etats-Unis d'Amérique.

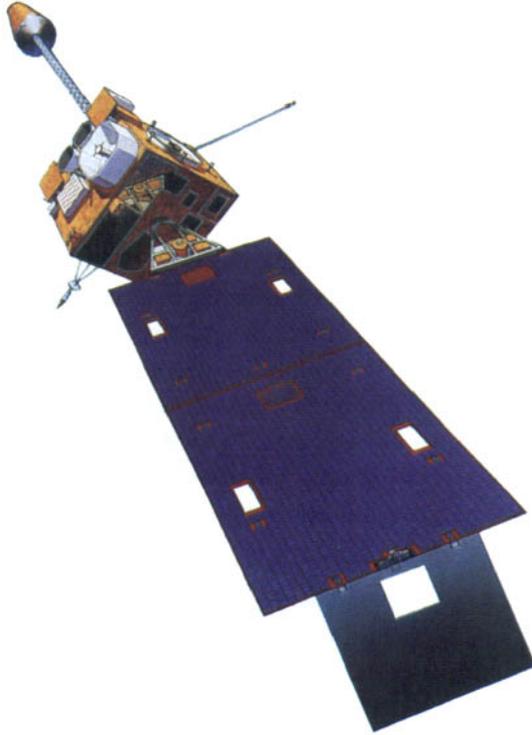


Figure 3.13 - Vue d'artiste du satellite GOES (crédit NASA-NOAA)

Lors de l'orage de mars 1991, une nouvelle ceinture de radiations apparut pendant plusieurs jours, augmentant d'un facteur 400 les micropannes à bord de satellites. Une trop grande charge de surface peut s'avérer fatale au satellite, comme cela a déjà été le cas les 20 et 21 janvier 1994 pour ANIK-E1, satellite canadien de télécommunication.

Plusieurs études de mise en charge à bord de satellites ont été menées, par exemple pour FREIA ¹¹ lancé le 6 octobre 1992, et qui finit ses opérations quatre ans plus tard. Il était incliné à 63°, passant dans les zones aurorales à chaque orbite, avec un périégée de 601 kilomètres et un apogée de 1 756 kilomètres. Toutes les expériences avaient pour but unique l'étude de la Terre et de ses relations avec le Soleil, 73 kilogrammes de science embarquée ! Sur les deux premières années de son activité, pendant une phase d'activité solaire décroissante, plutôt faible, une dizaine de cas de charges intempestives furent recensés et étudiés. Aucun n'a mis définitivement hors jeu des instruments, mais ils les ont affectés pendant des périodes de quelques secondes à plusieurs centaines de secondes, avec des différences de potentiel s'éle-

¹¹ FREIA, satellite géophysique suédois, porte le nom de la déesse nordique de la fertilité. Mais celle-ci est loin d'être douce et gentille : impératrice du royaume des dieux nordiques, aux côtés d'Odin, elle est une guerrière, avec pouvoir de vie et de mort, d'amour et de bataille, de fertilité et de magie noire ! La moitié des morts d'une bataille lui revient, pour son seul amusement.

vant jusqu'à 2 000 volts. La difficulté pour prévoir ces événements est due au fait qu'ils apparaissent aussi bien côté nuit que côté jour de la Terre.

Cependant, FREIA n'est pas un engin représentatif : fabriqué à des fins de recherche ionosphérique, il était extrêmement bien protégé. Or, la tendance spatiale actuelle est d'utiliser de l'électronique commerciale, moins chère que des circuits fabriqués spécialement. Et un prix bas va souvent de pair avec une plus grande fragilité...

Les contrôles d'attitude sont des pièces maîtresses de l'équipement embarqué, puisqu'ils indiquent au satellite sa position dans l'espace. Leur détérioration à la suite d'un orage magnétique peut entraîner la perte d'un satellite, comme cela a été le cas lors de l'éruption solaire du 14 juillet 2000 dont nous avons fait mention dans le premier chapitre. Cette éruption et une éjection de masse coronale associée ont provoqué le lendemain un orage magnétique qui a modifié l'orientation du satellite japonais ASCA, dont la mission était l'observation de l'univers dans la gamme du rayonnement X. Les batteries alimentées par des panneaux solaires se sont alors déchargées, entraînant la fin du satellite.

Le domaine le plus exposé est certainement celui des constellations de satellites de télécommunications. Il s'agit de dizaines de microsatellites légers, couvrant l'ensemble de la Terre d'un réseau qui permet de se téléphoner de n'importe quel point à n'importe quel autre. Un bon exemple est la constellation Skybridge¹². Composée de 80 satellites en orbite basse, elle doit fournir aux particuliers comme aux entreprises des capacités de bande passante dont les performances devraient être similaires aux futures technologies terrestres à haut débit. Cette plate-forme se propose de fournir un accès rapide à Internet ainsi qu'aux différents services interactifs tels que le télé-travail, le télé-enseignement, les vidéoconférences et les jeux interactifs. Les services seront proposés via des opérateurs de télécommunications et des fournisseurs de services locaux. La multiplicité des applications de telles constellations rend indispensable de se prémunir contre des pannes globales dues à des décharges d'origine solaire.

Le besoin de rentabilité industrielle et le coût énorme de la mise en orbite imposerait l'utilisation de composants usuels, en place de leur développement spécifique. Mais le nombre élevé de satellites accroît le risque de panne. En particulier, un orage magnétique très fort pourrait affecter l'ensemble de la flotte. D'ores et déjà, le coût annuel des anomalies en vol dues à l'environnement spatial est évalué à une trentaine de millions de dollars pour les seuls Etats-Unis.

12 Le programme SkyBridge est piloté par Alcatel Alsthom, en partenariat avec Loral Space & Communications (USA), Toshiba Corporation, Mitsubishi Electric Corporation et Sharp Corporation (Japon), SPAR Aerospace Limited (Canada), Aérospatiale (France), le CNES (France), COM DEV Int. Ltd. (Canada) et la Société Régionale d'Investissement de Wallonie (Belgique). Le lancement est prévu à la fin de l'année 2001.



Figure 3.14 - Représentation de la constellation Skybridge
(crédit Alcatel <http://www.skybridgesatellite.com>)

Les problèmes de dégradation à bord ne sont pas les seuls à se poser. Lorsque le Soleil est actif, un nombre accru de photons chauffe l'atmosphère qui se dilate¹³ et transporte les satellites vers le haut, comme le fait une vague pour un bateau, avec la fâcheuse conséquence que les opérateurs au sol perdent temporairement les orbites !

Dans l'atmosphère, nos vaisseaux de l'espace subissent également des frictions diverses, très difficiles à évaluer, mais dont l'effet est contraire à celui décrit précédemment : les satellites se rapprochent de la Terre. Suivant les lois de la mécanique, les satellites qui se rapprochent de la Terre le font en augmentant leur vitesse de rotation. En temps normal, le demi-grand axe de l'orbite d'un satellite décroît d'environ 1 mètre par jour, ce que l'on compense par des corrections à l'aide de petits moteurs auxiliaires. Les variations de concentration atmosphérique, plus violentes lorsque l'activité solaire est tumultueuse, entraînent une diminution de la vitesse qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par jour. La position du satellite est alors connue avec une mauvaise précision : à moins de 8 kilomètres près. Entre le 2 et le 11 novembre 1993, de forts champs électriques dus à une perturbation solaire ont généré des vents de quelques centaines de kilomètres à l'heure vers 300 kilomètres d'altitude à des latitudes aussi basses que celles de la France. Les satellites, qui voyagent typiquement à 8 kilomètres par seconde ne sont d'ordinaire pas très sensibles aux vents atmosphériques, mais dans de telles conditions, la friction cesse d'être négligeable.

¹³ La dilatation fait "monter" les couches denses de la basse thermosphère. Ainsi, à 400 kilomètres, le nombre de particules neutres par unité de volume peut être multiplié par dix.

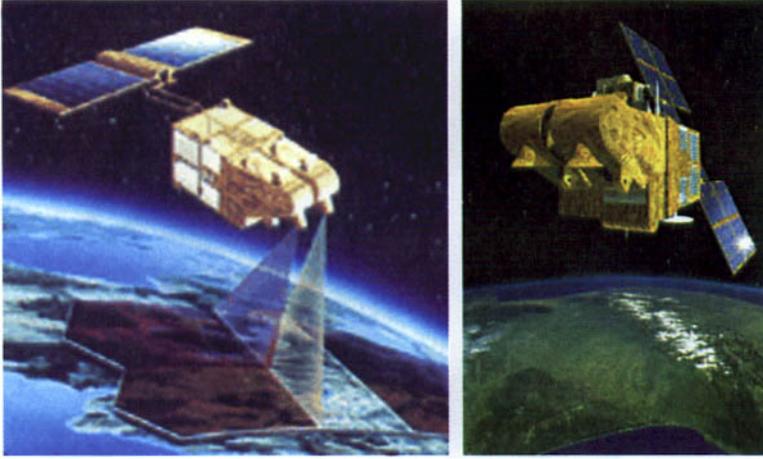


Figure 3.15 - Deux vues d'artiste du satellite SPOT (crédit CNES)

En octobre 1997, le demi-grand axe de SPOT-2 ¹⁴ a varié de plus de 30 mètres par jour pendant 3 jours. Quelques mètres d'incertitude sont parfois des centaines de fois trop. C'est bien sûr le cas pour les satellites ERS-1 et 2, qui volent sur une orbite quasi circulaire proche de 780 kilomètres d'altitude : pour connaître la hauteur de la mer, il faut savoir d'où on mesure. La précision requise sur leur position est de 5 centimètres en hauteur, alors que leur orbite varie de 10 mètres par jour lorsque l'activité solaire est très intense.

1.7. L'ENTRÉE D'UN ENGIN SPATIAL DANS L'ATMOSPHÈRE

Il faut également bien connaître la friction lorsqu'un engin spatial rentre dans l'atmosphère. C'est le cas des navettes spatiales, des modules de la Station Spatiale Internationale, ou lorsque se produit un accident, de tout engin qui plonge vers le sol. A la fin des années 1970, Skylab – 82 tonnes – était la première station spatiale américaine. Lancée par une fusée Saturn-V, la même que celle qui fut utilisée pour les missions Apollo vers la Lune, elle rencontra très vite des problèmes techniques dus à des vibrations au décollage, mais aussi au décollement d'une protection contre les météorites, arrachant l'un des panneaux solaires. Un morceau de ce panneau vint malheureusement frapper le second, l'empêchant de se déployer. Vingt-huit jours plus tard, une première mission d'astronautes procéda à des réparations. Le 11 juillet 1979, 84 jours et une heure après son lancement, elle s'écrasa dans l'océan Indien. Personne n'a pu prévoir plus de quelques heures à l'avance le lieu précis de sa chute.

¹⁴ SPOT, Satellite Pour l'Observation de la Terre, est un système d'imagerie optique spatiale à haute résolution. Ce programme décidé par le gouvernement français dès 1977 est conçu par le CNES, et réalisé en collaboration avec la Belgique et la Suède. Il est constitué d'une série de satellites et d'infrastructures terrestres de contrôle, de programmation, de réception et de production d'images.



Figure 3.16 - La station Skylab photographiée par son second équipage (CONRAD, KERWIN et WEITZ), lors de leur départ vers la Terre (crédit NASA)

En 1980, 4 mois en avance, les programmes de calcul d'orbites ne pouvaient prévoir à quel moment le satellite MAGSAT entrerait dans l'atmosphère mieux qu'à dix jours près. Autant dire que l'on ne prévoyait pas encore où il tomberait !

La friction n'a pas que des aspects négatifs : de nombreux satellites en orbite basse l'utilisent pour leur évolution. Mais elle est mal évaluée parce que la composition de l'atmosphère est mal connue. Il suffit de quelques centaines de mètres d'erreur pour perdre l'engin. Comme les forces aérodynamiques dominent aux altitudes de vol des satellites en orbite basse, en dessous de 600 kilomètres, l'objectif actuel est de prévoir 24 heures à l'avance les positions futures des satellites à 20 kilomètres près, y compris en période perturbée.

1.8. LES DÉBRIS SPATIAUX ET LEURS EFFETS

Aussi redoutables que le rayonnement, les particules ou le chauffage atmosphérique, sont les débris spatiaux. Certains d'entre eux ont une origine naturelle : poussières interstellaires, météores, météorites qui résultent de l'ablation de comètes. Mais un nombre croissant de débris spatiaux est issu d'étages de fusées, de satellites défunts, de morceaux d'engins spatiaux divers.

L'usage, lorsqu'un satellite arrive en fin de vie, est de le laisser purement et simplement tomber dans l'atmosphère où il est censé se consumer. Cette chute est souvent lente à se produire, car elle n'est pas impulsée par un moteur : un étage de lanceur d'un satellite géostationnaire met entre 10 ans et 10 000 ans pour retomber, selon que son périhélie est à 200 ou 600 kilomètres.

Aujourd'hui, parmi les objets spatiaux recensés, seulement 6% sont des satellites fonctionnels. 22% sont des satellites ayant fini leurs opérations, 17% des étages supérieurs de fusée, et le reste, 55%, est constitué de fragments et débris divers¹⁵. Nous laissons donc un problème crucial à résoudre aux générations futures.

En se dispersant dans l'atmosphère, un engin spatial génère des débris qui peuvent devenir des projectiles dangereux pour les autres satellites ou pire, pour une station spatiale habitée : une particule de 100 grammes transfère plus de 3 mégajoules lors d'un impact ! En 1990, le satellite américain LDEF a été récupéré par la navette spatiale après 6 ans de vol. Son examen a révélé plus de 30 000 impacts de débris visibles à l'œil nu, des perforations de parois d'aluminium de 3 millimètres, et la dégradation du mylar et du teflon le recouvrant, peluchant sous l'effet du rayonnement solaire. Un autre exemple célèbre est celui du satellite français CERISE, dont le mât stabilisateur fut coupé en juillet 1996 par la collision avec un débris provenant de l'explosion de l'étage d'une fusée Ariane. Cette fusée avait mis le satellite SPOT-1 sur orbite en février 1986. L'étage explosa 9 mois plus tard, générant plus de 700 débris d'une taille supérieure à un poing. Depuis, Arianespace procède à la "passivation" des étages après la mise en orbite. Il s'agit essentiellement de vidanger totalement les réservoirs pour éviter une explosion. Il est en outre convenu entre agences spatiales de faire monter les satellites géostationnaires en fin de vie d'environ 200 kilomètres au-dessus de leur orbite, de façon à ce qu'ils échappent doucement à l'attraction de la Terre. Mais aucune solution n'a été trouvée pour rendre inoffensifs les satellites en orbite basse.

Il est donc devenu nécessaire de maintenir ces débris sous haute surveillance. C'est possible pour une partie d'entre eux, ceux dont la taille excède 10 centimètres et qui sont au nombre d'environ 8 500. 8 500 "seulement", serait-on tenté de dire, face aux 110 000 débris dont la taille va de 1 à 10 centimètres, ce qui est à peu près 300 fois moins que les plus petits débris, impossibles à localiser. Au total, ce sont plus de 2 millions de kilogrammes de déchets qui orbitent au-dessus de nos têtes. Le risque de perte d'un satellite par collision avec l'un de ces débris est pour le moment de un pour 10 000, mais il croît de façon exponentielle avec le temps. Suivre les plus gros objets est déjà une gageure : les marées atmosphériques les déportent de plusieurs centaines de mètres en quelques minutes. Par exemple, lors d'un événement solaire violent, le centre de suivi des débris (NORAD) a perdu la trace de 1 300 d'entre eux !

15 La plupart des chiffres concernant les débris spatiaux proviennent du CNES. Cette agence spatiale prend le problème très au sérieux, déploie de grands efforts pour identifier et suivre les débris actuels, et pour réduire leur nombre dans le futur.

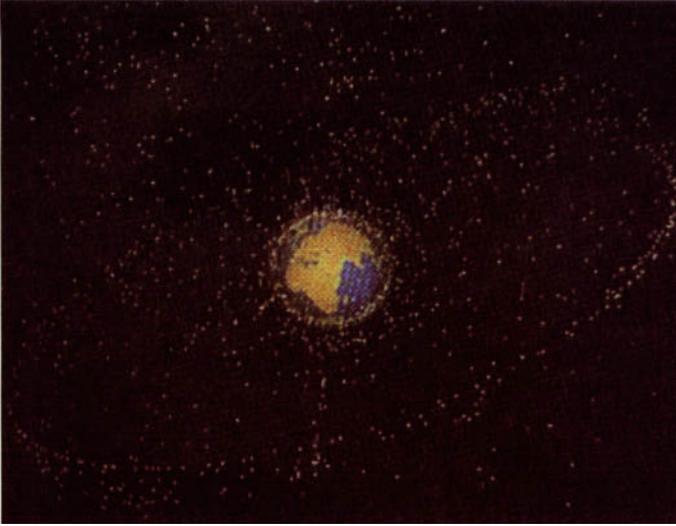


Figure 3.17 - Chaque point de cette image représente un débris spatial (en 1993)
On distingue parfaitement la couronne des débris de satellites en orbite géostationnaire, à 36 000 kilomètres de la Terre (crédit ESOC).

Il faut donc quantifier en temps réel toute modification de la thermosphère sur l'ensemble du globe, pour permettre aux opérateurs spatiaux de garder la trace des débris. La prévision à l'échelle de quelques heures est également nécessaire pour préparer d'éventuelles manœuvres d'évitement par un satellite ou par la Station Spatiale Internationale. Ce fut le cas par exemple en juillet 1997 pour le satellite SPOT, à cause d'un risque de collision avec un débris du lanceur Thor Agena. Cet évitement a généré la perte de deux jours de prise de vue et la consommation de 400 grammes de carburant. Est-ce peu ? C'est énorme ! C'est près de trois ans et demi de consommation pour le maintien en orbite.

Lors de leur plongée vers la Terre, les objets les plus gros, dont la masse excède 5 tonnes, ne sont que partiellement détruits. Le point d'impact est encore impossible à prévoir avec précision, car l'atmosphère des hautes couches est mal connue. Les autres objets satellisés potentiellement dangereux sont ceux équipés de générateurs électronucléaires. En 1978 pour la première fois, l'un d'entre eux – COSMOS-954 – est rentré dans l'atmosphère, faisant craindre une contamination radioactive planétaire au cas où ses protections ne s'étaient pas avérées suffisantes. La catastrophe n'a heureusement pas eu lieu : la pollution aurait pu être très dangereuse en cas d'explosion dans les basses couches atmosphériques, et nous ignorons tout du danger que provoquerait l'éclatement de tels objets à très haute altitude. Pour l'instant, les agences spatiales en sont à des opérations de suivi et de prévision de chute, dans le but d'améliorer leurs modèles et d'acquérir un savoir-faire qui leur permette, dans l'avenir, de contrôler les chutes. Outre COSMOS-954, les rentrées de deux satellites soviétiques à générateur électronucléaire, d'une station orbitale (SALIOUT-7), d'un satellite militaire chinois (CHINA-40) ont été suivies et analysées de janvier 1978 à

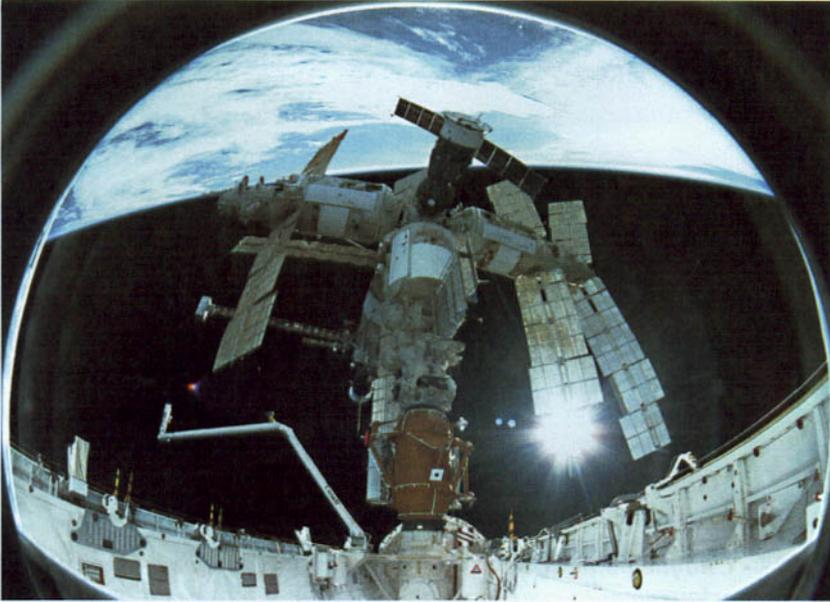


Figure 3.18 - Il fallait au moins un grand angle pour photographier une station de la taille de MIR ! (crédit Agence Spatiale russe)

mars 1996. SALIOUT-7 a constitué une rentrée particulière. D'une masse de 40 tonnes, cette station lancée en 1982 sur une orbite basse circulaire de 350 kilomètres arrivait en fin de vie au début des années 1990. Lorsque le centre de contrôle satellite russe décida de provoquer son retour, le CNES se mit en phase d'alerte, jusqu'à mettre en opération tous ses moyens d'observation disponibles 24 heures sur 24 en février 1991. Les enseignements qui en ont été tirés ont été primordiaux pour modéliser la rentrée de la station russe MIR, d'une masse de 140 tonnes ¹⁶. Lors de sa chute, provoquée et contrôlée par un vaisseau "Progress" arrimé à la station, ce qu'on a parfois surnommé la "datcha de l'espace" s'est fragmentée dans l'atmosphère en 110 tonnes de débris, le reliquat de 30 tonnes plongeant dans l'océan Pacifique. La majeure partie des débris a été consumée à des altitudes inférieures à 90 kilomètres.

2. AUTRES IMPACTS DE L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Jusqu'ici, nous avons traité des impacts assez techniques de l'activité solaire, c'est-à-dire à travers des phénomènes très physiques, bien identifiés, pour lesquels des solutions peuvent être trouvées, même si certains concernent l'homme directement. D'autres problèmes apparaissent dans des domaines qui relèvent de l'environnement et de l'activité humaine. Quels sont-ils ?

¹⁶ Pour éviter un drame qui aurait pu avoir pour conséquence des centaines de milliers de victimes en cas de chute sur une grande métropole, la chute de MIR a été provoquée.

2.1. LES EFFETS BIOLOGIQUES

Les radiations qui viennent de l'espace, et plus particulièrement du Soleil, ont d'importants effets biologiques. Il est démontré, par des expériences de laboratoire sur des spores, des bactéries, des graines de plantes et des embryons animaux, que les impacts d'ions lourds provoquent des microlésions. Des rats ont subi des lésions définitives de rétine. Chose inquiétante, ces lésions sont beaucoup plus importantes lorsque le tissu a été au préalable irradié de rayonnement X, c'est-à-dire dans un milieu comparable à celui de la thermosphère, leurs effets secondaires sont plus graves, et leurs réparations cellulaires plus lentes. Naturellement, aucune expérience humaine à proprement parler n'a été tentée. Toutes les données disponibles sont issues des vols habités, des victimes de bombes atomiques et des maladies professionnelles de travailleurs en contact avec des matériaux radioactifs. Il existe diverses catégories de conséquences des irradiations aux rayonnements ou aux particules. Les effets à court terme apparaissent entre quelques minutes et 2 mois après l'exposition aux radiations : brûlures, vomissements, maux de têtes... Les effets à long terme apparaissent plusieurs mois ou années plus tard. Ils vont de perturbations de l'organisme qui réduisent la durée de vie – le plus souvent des cancers – à des modifications génétiques.

Les médecins ont tenté de définir une unité de radiation, le sievert ¹⁷, et pour chaque âge d'un humain, un seuil en dessous duquel il n'y a pas de risque connu. On est exposé, dans la nature, à un rayonnement moyen de 2,4 millisieverts par an. Un examen radiologique expose à une dose de 0,7 millisieverts. Une dose de 2 sieverts est létale. Les symptômes décrits plus hauts apparaissent à environ 200 millisieverts. Un cancer de l'estomac est réputé se déclencher avec une probabilité de 1% à l'exposition de 1 sievert.

Les seuils aujourd'hui avancés pour les spationautes de la NASA sont de 1 millisievert par jour, 250 millisieverts en un mois, 500 en un an et 1 500 dans toute la carrière. Or, une éruption solaire expose les spationautes à une dose de plusieurs centaines de millisieverts, notamment en cas de sortie extra-véhiculaire. Certains événements solaires ont irradié 1 sievert par jour à 1 UA ¹⁸. Le 4 août 1972, la dose reçue au niveau de la Lune s'élevait à 7 sieverts par heure à son maximum. Ce bombardement eut lieu, par une chance inouïe, entre les missions Apollo 16 et 17. Si, par malheur, des spationautes l'avaient subi, malgré le blindage de leur module, ils auraient reçu une dose intégrée de 15 sieverts, très probablement mortelle.

Il ne faut pas s'alarmer outre mesure : aucun accident grave n'a encore été à déplorer, côté américain comme côté russe, en raison du rayonnement. Malgré ces risques, un grand nombre de pays ont commencé à assembler la Station Spatiale Internationale.

17 Le sievert est l'équivalent de dose, dont l'équation aux dimensions est $L^2 T^{-2}$. Une dose de 1 sievert correspond à un rayonnement de 1 joule par kilogramme de matière irradiée.

18 Ce rayonnement est absorbé par l'atmosphère terrestre et ne menace pas la vie à la surface de la planète. Il expose en revanche les spationautes à de sévères accidents.

Avec un rythme de plus en plus soutenu, des spationautes décollent pour aller l'assembler. Comment protéger ces mécaniciens de l'espace ? Il faut tout d'abord leur construire une cabine sarcophage dont le blindage les protège. Pour cela, s'il est en aluminium, il doit avoir une masse volumique de 50 grammes par centimètre cube. C'est très lourd, et donc très cher à mettre en orbite. En second lieu, il faut prévoir les éruptions. Lorsqu'on les voit, il est trop tard : les spationautes ont déjà été exposés, et il ne leur est plus nécessaire de rentrer dans leur station. Les temps de prédiction requis sont donc dictés par la durée du transfert des spationautes depuis l'espace dans leur habitacle : quelques minutes.

Malheureusement, tout n'est pas réglé lorsque des seuils de "tolérance" sont définis. En effet, les études récentes montrent qu'un seul proton, très énergétique bien que très en dessous du seuil, crée sur son passage des dégâts considérables, amplifiés par l'environnement radiatif (rayons X, ultraviolets...). A l'heure actuelle, il est nécessaire de comprendre ces effets dévastateurs, et de définir les conditions qui permettront de protéger les spationautes.

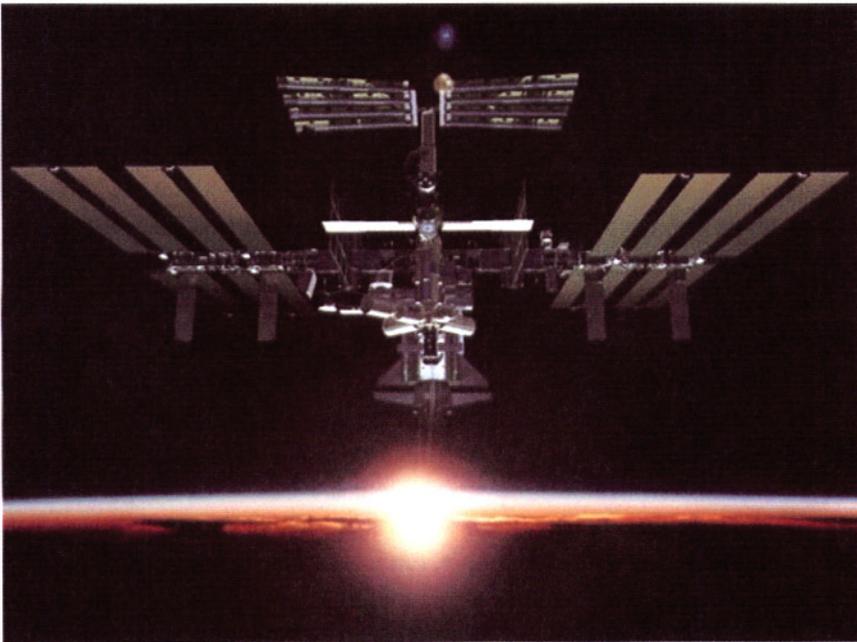


Figure 3.19 - Première mouture de la Station Spatiale Internationale
 Lorsqu'elle sera terminée, elle aura une masse d'environ 400 tonnes, et 1 300 mètres cubes habitables, soit l'équivalent du volume passager de deux gros jumbo-jets. Avec une longueur de 108 mètres, elle hébergera en permanence un équipage de trois spationautes pendant la phase d'assemblage, et six ou sept lors de la phase opérationnelle, prévue à partir de 2003. Il y aura six laboratoires à bord, dont le laboratoire européen Columbus, vu ici à gauche. L'ESA étudie en outre, avec la NASA, la mise au point du véhicule de secours, et participera au projet à travers le véhicule automatique de transfert (crédit NASA/ESA).



Figure 3.20 - Sortie extra-véhiculaire lors de la mission Perseus
(crédit J.P. Haigneré, CNES)

Mais les spationautes ne sont pas les seuls à voler. Le personnel navigant des avions de ligne est certes protégé par l'atmosphère et les carlingues, mais il reste de très nombreuses heures en l'air. La mesure des radiations reçues est compliquée par le fait que toute hôtesse de l'air, steward ou pilote, sait que s'il dépasse la dose de 100 millisieverts sur cinq années consécutives, ou 50 sur une année, elle ou il restera cloué au sol. Une grande compagnie aérienne en a fait les frais, car les personnels jetaient ou "oubliaient" les badges de mesures censés doser le rayonnement reçu. Des campagnes de mesures sont donc menées sur les avions eux-mêmes, à bord de Concorde ou de Boeing. Rien d'alarmant n'a été mesuré : 307 microsieverts¹⁹ sur l'aller-retour Tokyo-Paris, 56 pour Paris, Los Angeles ou Buenos Aires... Néanmoins, pour les vols à haute altitude, en particulier militaires, des procédures de détournement d'urgence des plans de vol sont mises en place en fonction des conditions d'émissions solaires.

2.2. LE CLIMAT

Les enregistrements géophysiques et historiques témoignent du fait que l'espèce humaine a déjà expérimenté plusieurs changements climatiques, c'est-à-dire sur des

¹⁹ 1 micro = 1 millième de milli.

échelles de temps relativement longues, et météorologiques, sur des échelles de temps de l'ordre de quelques années. Plusieurs phénomènes y contribuent. Certains ont une origine géophysique terrestre, telle la dérive des continents, les courants océaniques, le volcanisme. D'autres ont des origines "extraterrestres", comme la position de la Terre dans l'espace, les chutes de corps dans l'atmosphère... Ces domaines ne relèvent pas *a priori* de l'activité solaire, même s'il est certain qu'il faudra tôt ou tard unifier nos connaissances pour comprendre notre planète.

Les fluctuations de la source solaire ont, elles aussi, une influence qui peut être prépondérante sur le climat terrestre. Cette influence peut être directe : un changement de l'irradiance totale produit une réponse immédiate de la température terrestre. Le rayonnement solaire varie en fonction de la nature du site d'émission : une tache ne rayonne pas comme une facule, ni comme un trou coronal, si bien que le climat est directement corrélé à l'activité solaire. Une variation de 0,3% de la constante solaire (soit 4 watts par mètre carré) entraîne une variation de la température moyenne sur terre de 0,4 °C. Il n'est donc guère étonnant que plusieurs études montrent une influence du cycle solaire de 11 ans sur certains phénomènes météorologiques. Une telle corrélation a même pu être établie sur les cinq derniers siècles, en utilisant les relevés de taches solaires existants²⁰. Il existe également des témoignages spectaculaires de l'influence de l'activité solaire sur le climat terrestre. Par exemple, le petit âge glaciaire de 1550 à 1750 connaît des hivers si froids que les principales rivières françaises gèlent. Paris en garde une trace, par le nom de la rue de la Glacière dans le 13^e arrondissement. De 1650 à 1750, le sud-ouest de l'Amérique du Nord fait l'expérience d'une forte période de sécheresse. Or, toute cette période correspond au minimum de Maunder (1645 à 1715) au cours duquel le Soleil a été exempt de taches.

Il existe des couplages beaucoup plus subtils. L'impact des rayons cosmiques, qui reste à confirmer, est de ceux-ci. Ce rayonnement cosmique est celui des autres étoiles de l'univers, ou encore le rayonnement de noyaux actifs de galaxies. En raison de leur éloignement, seules les particules les plus énergétiques parviennent au niveau de la Terre, les autres étant arrêtées dans des collisions au cours de leur périple. Il s'agit principalement de protons et d'électrons de plusieurs mégaelectronvolts. Lorsque le Soleil est actif, la magnétopause s'épaissit, car il y a davantage de particules du vent solaire qui contournent la magnétosphère. Elles forment un écran plus efficace au rayonnement cosmique. En période calme en revanche, le rayonnement cosmique traverse plus facilement notre enveloppe magnétosphérique. Or, il semble que le rayonnement cosmique favorise la formation de noyaux de nucléation dans la basse atmo-

20 Il semble qu'après 1980, la corrélation soit moins bonne. Cela pourrait s'expliquer par l'effet de serre dû aux émissions provoquées par l'activité humaine. Cependant, il faut se garder de conclure sur cette seule corrélation car, à partir des mêmes résultats publiés en 1995 par deux météorologues danois, K. LASSEN et E. FRIIS-CHRISTENSEN, des analystes tentent de démontrer qu'il n'y a pas de réchauffement global quand d'autres en font une preuve de l'existence de ce même réchauffement.

sphère, sur lesquelles les gouttes d'eau peuvent condenser et donner naissance à des nuages. Le processus physico-chimique est encore peu connu, mais les mesures faites au cours du dernier cycle solaire montrent que la nébulosité à l'échelle de la planète est plus élevée en période de faible activité solaire qu'en période d'activité importante, probablement sous l'effet de ce processus.

Nous n'avons naturellement mentionné que les couplages pour lesquels nous avons quelques appuis expérimentaux. Nous ne savons pas du tout si les variations de la thermosphère et de l'ionosphère dues aux variations du flux ultraviolet solaire ont un impact sur le climat. Il y a peu de temps, la question elle-même aurait semblé incongrue, car nous avons pris la mauvaise habitude de trop compartimenter nos sujets d'études. Soleil, vent solaire, magnétosphère, thermosphère, mésosphère, stratosphère, troposphère... l'idée selon laquelle chaque couche joue sur les autres est récente, et prend corps tout doucement. C'est seulement en 1988 que des chercheurs²¹ ont montré que l'augmentation de la concentration de quelques gaz conduirait à une baisse de la température de la moyenne atmosphère : en supposant un doublement de la concentration du dioxyde de carbone et du méthane à 60 kilomètres, ils montrèrent que la mésosphère se refroidirait d'environ 5 kelvins, et la thermosphère au-dessus de 200 kilomètres de 40 kelvins. D'où viendrait l'augmentation des concentrations de ces gaz ? De la pollution de la troposphère. On pense qu'on les aura effectivement doublées au milieu du vingt et unième siècle.

Les conséquences de cette diminution de température sont mal estimées. L'une d'entre elles consistera en une contraction, et par voie de conséquence, un abaissement de la couche F de l'ionosphère qui descendra sur une altitude de 15 à 20 kilomètres. Cette théorie a reçu le nom du "ciel qui tombe", sans doute en hommage à quelques gaulois de renommée internationale. Une telle chute, de l'ordre de 200 à 300 mètres par an, est encore difficilement mesurable. Il est clair en particulier qu'elle ne peut être régulière, dépendant de l'activité solaire. Il n'existe pas à ce jour d'étude sur l'impact de cette chute du ciel au-dessus de nos têtes, que ce soit en terme de filtrage du rayonnement ou des particules. Un pan entier de la géophysique reste à défricher²².

21 Il s'agit du Belge G. BRASSEUR et de l'Américain HITCHMAN.

22 Un dernier problème, qui peut avoir une influence sur le climat, mérite d'être souligné : nous ne connaissons pas avec certitude le diamètre solaire. Or, celui-ci est un paramètre essentiel pour connaître la constante solaire. Sait-on même s'il varie ? De 1650 à 1760, J. PICARD, P. LA HIRE et T. MAYER ont tenté de l'observer avec leurs capacités instrumentales. Malgré des barres d'erreurs de plus de 2 000 kilomètres, ils ont mis en évidence une réduction du diamètre solaire. Si l'on ajoute des mesures plus récentes et plus fiables, cette diminution s'élève à environ 350 kilomètres par siècle, à laquelle se surajoute peut-être des pulsations globales très mal connues de période 3, 120 et 400 ans. Il existe quelques interprétations à ces variations, mais elles sont encore au niveau de l'hypothèse de travail.

2.3. LES COMPAGNIES D'ASSURANCES

Entre 1989 et 1998, l'une des plus grosses compagnies d'assurances²³, de celles qui assurent leurs collègues de moindre envergure, a assuré pour plus de 5,6 milliards de dollars le lancement et la vie opérationnelle de divers satellites (16 milliards de dollars toutes compagnies confondues). Les remboursements ont été de l'ordre de 4,6 milliards de dollars, ce qui laisse tout de même un confortable bénéfice. Cependant, en 1998 pour la première fois, les remboursements ont excédé les primes. Dans la même période, s'arrêtant au premier avril 1998, on a compté 51 échecs de missions satellitaires, dont 37 lors des phases de lancement ou de mise sur orbite. Voici le scénario catastrophe que l'on peut imaginer :

Un événement solaire d'une rare violence engendre un orage magnétique d'une ampleur particulièrement grande. Un peu plus élevé en intensité que l'éruption du 4 août 1972, dont nous avons déjà fait mention, et qui eût tué des spationautes en route vers la Lune. Ou encore l'événement à protons du 23 février 1956, qui a expulsé 45 fois plus de rayons cosmiques solaires que le niveau habituel. La magnétopause est poussée par le vent solaire en aval des satellites géostationnaires. Ceux-ci se trouvent alors directement sous le feu de particules solaires. Certains contrôles d'attitude tombent en panne : ces satellites sont perdus.

Des instruments de transmission cessent de fonctionner. A plus basse altitude, la dilatation thermosphérique a déjà entraîné, quelques heures plus tôt, la perte de quelques dizaines de satellites soulevés par l'atmosphère. Les débris les plus gros sont éparpillés, et l'un d'entre eux vient perforer une paroi de la Station Spatiale Internationale, mettant en danger la vie des humains à bord. Au sol, des centrales électriques en Scandinavie et au Canada cessent de fonctionner en raison de la fonte de plusieurs générateurs. La perte des télécommunications crée une indescriptible pagaille dont plusieurs personnes tirent partie en lançant sur les réseaux informatiques encore valides des opérations boursières juteuses, profitant de l'incapacité de communiquer de leurs concurrents.

Le coût d'une telle catastrophe est tel que les compagnies d'assurance font faillite, incapables de rembourser les satellites qu'elles étaient censées couvrir. Les grandes banques, qui sont leurs actionnaires, les suivent dans la banqueroute. En quelques jours, le Soleil entraîne le "crash" des économies occidentales.

Sauf si ...

- ◆ Sauf si, d'une part, on peut prouver qu'il s'agit d'une catastrophe naturelle. Ce que les assureurs aimeraient bien, pour des raisons évidentes. Ils font donc partie des intervenants dans la ronde des promoteurs non scientifiques de la recherche sur les relations Soleil-Terre.

23 La compagnie Cekar et Jutheau.

- ◆ Sauf si, d'autre part, un service scientifique et technologique est capable, quelques jours ou quelques minutes à l'avance, de donner l'alerte. Alors, les satellites sont mis en état de veille et si possible tournés pour présenter au vent solaire une face protégée.
- ◆ Sauf si, enfin, les scientifiques ont réussi à réaliser les protections nécessaires aux pires cas solaires, de la même façon que les barrages sont dimensionnés pour les crues les plus importantes définies par les hydrologues.

2.4. LA DÉFENSE MILITAIRE

Certains besoins militaires sont identiques à ceux des civils : contrôler la distribution en énergie, assurer la permanence des télécommunications, protéger leurs satellites. D'autres besoins leur sont spécifiques. Par exemple, la détection lointaine se fait encore dans certains pays par des radars HF dits "trans-horizon". Lors d'orages magnétiques, ceux-ci sont encore capables de détecter la présence d'une cible, mais ils perdent leur précision, ne pouvant plus déterminer où elle se trouve. Lorsqu'il s'agit d'un avion, l'opérateur a généralement plusieurs minutes pour le localiser. Mais si l'objet détecté est un missile, le délai passe à quelques secondes.

Les militaires ne sont pas seulement avides de connaître l'environnement : ils souhaitent également l'influencer. Ils ont constaté que les explosions atomiques atmosphériques pompaient les ceintures de radiations. En 1962, cela a conduit à la perte d'un satellite. La question qu'ils se posent est "comment perturber ces ceintures lors d'un conflit ?". L'ennemi, surpris, égarerait l'ensemble de ses engins spatiaux en orbite moyenne et basse, et perdrait donc la quasi-totalité de ses communications ce qui, comme l'ont montré nombre de guerres récentes, conduit inéluctablement à la défaite. Les satellites du vainqueur subiraient eux aussi les modifications de leur environnement, mais celles-ci étant pilotées, leurs orbites resteraient sous contrôle.

Il existe d'autres moyens d'action à des fins inamicales : les ondes VLF peuvent induire des précipitations de particules dans la thermosphère, ce qui, domestiqué, permettrait de provoquer des bombardements ciblés de satellites. Des transmetteurs puissants peuvent modifier l'ionosphère, et donc la propagation des télécommunications pour, une fois encore, rendre inopérants les systèmes adverses. "Connais le sol, connais le temps, et ta victoire sera totale" énonce un dicton militaire. Le temps s'élargit aujourd'hui à l'espace : les Etats-Unis ont créé le 55^e escadron de météorologie de l'espace, utilisé par l'US Air Force pendant l'opération "tempête du désert" en Irak.

2.5. LE TOURISME ET L'ÉDUCATION DU PUBLIC

Les aurores polaires sont l'un des spectacles les plus grandioses, les plus beaux qu'il soit donné de voir. Les agences de voyages proposent aujourd'hui des forfaits Laponie, mais rien n'assure au touriste qu'il pourra contempler une aurore : il faut la présence

de la nuit (ce qui n'est pas le cas l'été), l'absence de nuages et de l'activité solaire un à deux jours avant l'observation prévue. Un service opérationnel de prévision permettrait de saisir toutes les opportunités d'observation. Sachant qu'il y a de fortes chances de voir une aurore à une date donnée, les guides peuvent adapter le séjour.

Faire connaître les aurores polaires n'a pas pour seul avantage de procurer une joie intense à leurs observateurs. Cela permet aussi de révéler les connections fortes entre la Terre et le Soleil, et de sensibiliser le public. L'un des paradoxes de l'étude des relations Soleil-Terre est qu'elle révèle des dangers souvent potentiels à des utilisateurs qui les ignorent. "Jusqu'à présent, tout a bien marché ; pourquoi les choses devraient-elles aller autrement dans le futur ?" pensent de nombreux industriels. Les convaincre de se prémunir de dangers qu'ils n'ont encore pas éprouvés, à des coûts parfois élevés, nécessite un effort de communication auquel les scientifiques ne sont généralement pas préparés. Les aurores peuvent y aider. Le prochain maximum solaire est prévu en 2011 : il est impossible de présager à quel niveau en seront nos sociétés, mais il est fort probable qu'en raison des progrès technologiques, elles seront encore plus sensibles à l'activité solaire qu'elles ne le sont aujourd'hui.

3. LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE POUR PRÉVOIR

3.1. L'ACTE DE NAISSANCE

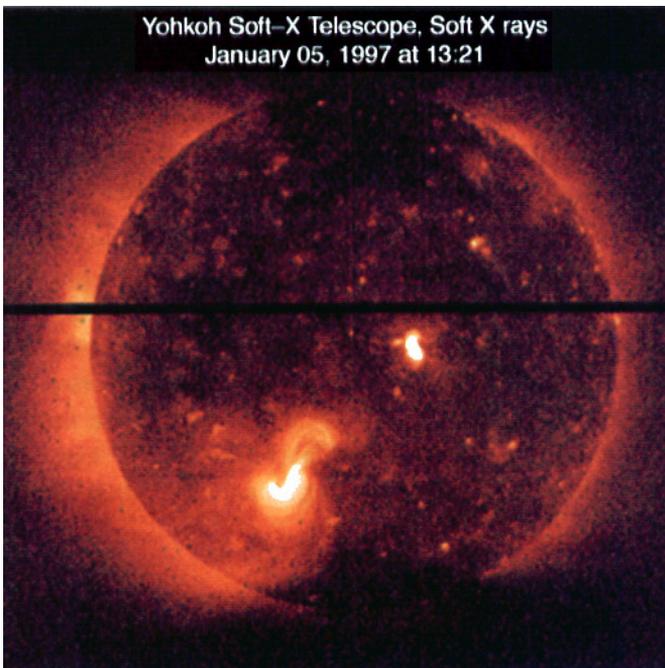


Figure 3.21 - L'éruption éclate sur le Soleil, comme un grand serpent en forme de S (crédit YOHKOH ; ISAS/LPARL ; NASA)

Le 6 janvier 1997, vers 16 heures en Temps Universel, l'instrument LASCO à bord du satellite SOHO observe une éjection de masse coronale, à environ deux rayons solaires de la photosphère. Les premières estimations semblent indiquer qu'il s'agit d'un événement important, et surtout qu'il se dirige tout droit à la rencontre de la Terre. Ces estimations sont rendues difficiles par le fait qu'il est vu de face, non loin du plan équatorial solaire. Néanmoins, il semble qu'il voyage à une vitesse d'environ 450 kilomètres par seconde. A cette vitesse, le vent solaire devrait atteindre SOHO vers le 10 janvier. Le télescope EIT est malheureusement arrêté pour une télémaintenance. En revanche, le télescope en rayonnement X de YOHKOH peut filmer l'éruption.

Le fait que cette éruption soit non prévue montre où nous en sommes dans cette science nouvelle. La veille encore, les images du Soleil montraient en effet peu d'activité. Il y avait bien un petit point brillant et quelques taches solaires à l'ouest du centre solaire, mais pas de quoi alerter les observateurs.

Par un hasard heureux, la plupart des physiciens du Soleil étaient réunis du 7 au 9 pour une session de travail. Dans l'enthousiasme général, les collègues des autres disciplines géophysiques sont contactés pour mettre leurs instruments en état d'alerte.

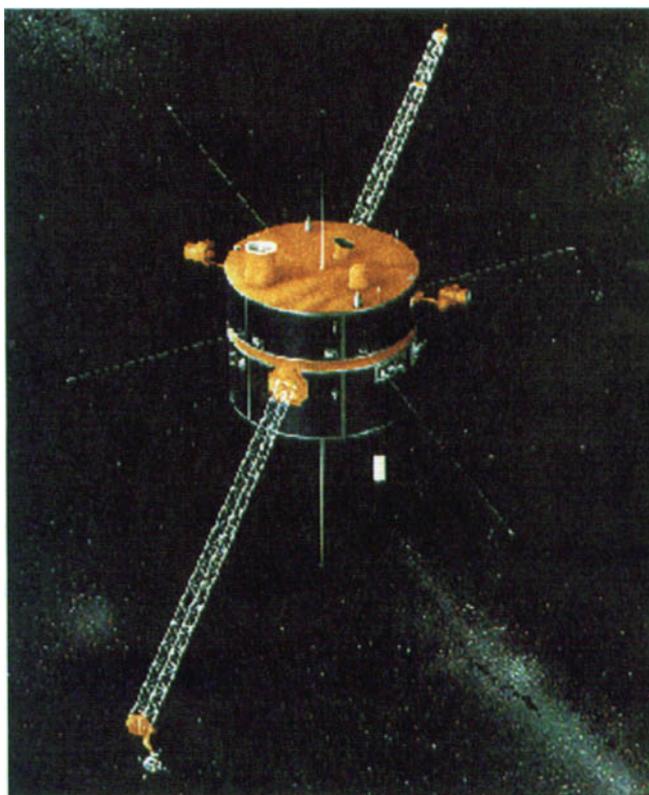


Figure 3.22 - Le satellite WIND est chargé de la surveillance du vent solaire (crédit NASA)

C'est ainsi que le 10 janvier, les données du détecteur de protons à bord de SOHO (l'instrument CELIAS) sont particulièrement attendues. Et en effet, juste avant minuit en Temps Universel, le détecteur mesure une soudaine augmentation de la vitesse du vent solaire, qui passe de 350 à 430 kilomètres par seconde. La concentration de particules est quasiment doublée, de sept à treize particules par centimètres cube. L'importance de l'événement se confirme. Quatre heures plus tard, la vitesse augmente de nouveau, passant à 520 kilomètres par seconde – c'est-à-dire presque 2 millions de kilomètres par heure – tandis que cette fois, la concentration chute de façon drastique, pour passer à deux particules seulement par centimètre cube.

A un peu moins d'une centaine de rayons terrestres en avant de la Terre se trouvait le satellite WIND²⁴, tous instruments en écoute. Moins d'une heure après SOHO, il détecte à son tour une onde de choc, annonciatrice du nuage magnétique. Celui-ci arrive vers 4 heures 45 TU. A cet instant, la composante verticale du champ magnétique, jusque-là orientée vers le nord, tourne brutalement vers le sud avec une intensité accrue. Il lui faut une douzaine d'heures pour revenir à son état d'équilibre.

GEOTAIL²⁵ se trouve par chance du côté jour de la Terre. Habituellement confiné à l'intérieur de la magnétosphère, il subit plusieurs traversées de la frontière, la magnétopause, à la suite de cette éruption. Tantôt, le vent solaire souffle en telles bourrasques qu'il la pousse vers la Terre. Tantôt, le vent solaire se calme et la laisse se relaxer.

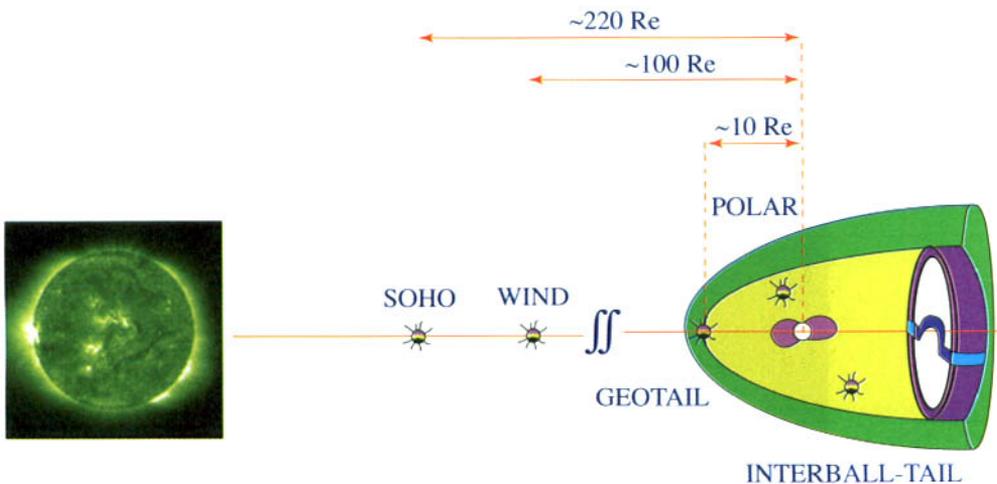


Figure 3.23 - Configuration des satellites dans le système Soleil-Terre, le 6 janvier 1997 (crédit ISTP)

24 Lancé le 1^{er} novembre 1994, WIND est le premier satellite du projet ISTP ; il vole entre la Terre et le Soleil dans le but d'effectuer des mesures de vent solaire.

25 GEOTAIL est un satellite de l'Institut de l'Espace et des Sciences Aéronautiques du Japon (ISAS), et de la NASA. Lancé le 24 juillet 1992, il étudie la dynamique de la magnétosphère terrestre depuis une huitaine jusqu'à environ 200 rayons terrestres.

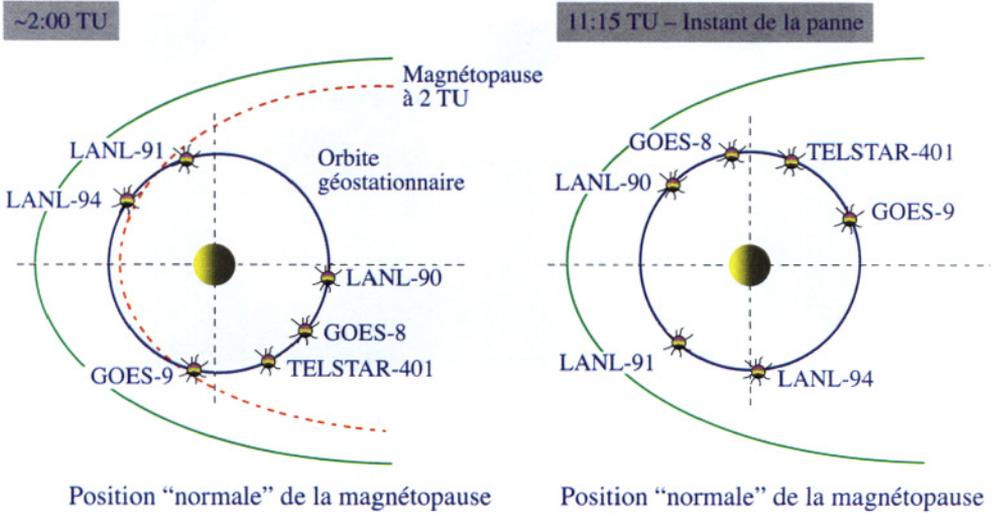


Figure 3.24 - Position des satellites géostationnaires (sur le cercle bleu)

La position normale de la magnétopause est figurée en vert. Sa position supposée est montrée sur la figure de gauche, en rouge, à 2 heures (Temps Universel). A droite, on voit où se trouvait le satellite TELSTAR au moment de sa perte.

Mais il n'y a pas que des satellites d'observation scientifique au-dessus de nos têtes. Le satellite TELSTAR-401 est chargé de transmettre les signaux de gros clients tels les chaînes télévisées américaines ABC, Fox ou PBS. Il appartient à la compagnie de télécommunications AT&T, l'une des plus grosses mondiales. Personne ne sait exactement ce qui cède sous l'effet de l'orage magnétique (le 11 janvier à 0 heure 15 TU). Le fait est que les stations au sol perdent brusquement contact avec lui, sans le retrouver malgré les efforts des opérateurs.

Pour AT&T, le coup est rude. En effet, un contrat vient d'être signé avec la société Loral Space & Communications Ltd., au terme duquel cette dernière lui rachète sa filiale satellite Skynet. La transaction s'élève à 712,5 millions de dollars, incluant le malheureux TELSTAR-401, dont la fabrication, le lancement et l'assurance coûtent la bagatelle de 200 millions de dollars !

Au sol, les aurores polaires se multiplient. Le satellite POLAR, lancé le 24 février 1996 dans le cadre de l'ISTP, a pour mission l'étude des pôles et des cornets polaires. Il saisit l'expansion de l'ovale auroral en temps réel.

Le 11 janvier, le sous-orage débute vers 10 heures 30 TU, heure de la première intensification des aurores. Sur terre, elles sont particulièrement sensibles là où il est 23 heures locales ou 3 heures du matin locales. Un quart d'heure plus tard, l'ovale s'étend à la fois vers le pôle et vers l'est de la Terre, c'est-à-dire vers le coucher du Soleil. Et en effet, une seconde intensification se précise là où, au sol, il est 21 heures locales, avec des rideaux auroraux très brillants. Encore un quart d'heure, et c'est tout l'ovale qui se met à étinceler de mille feux auroraux, avec des périodes extraordinairement lumineuses.

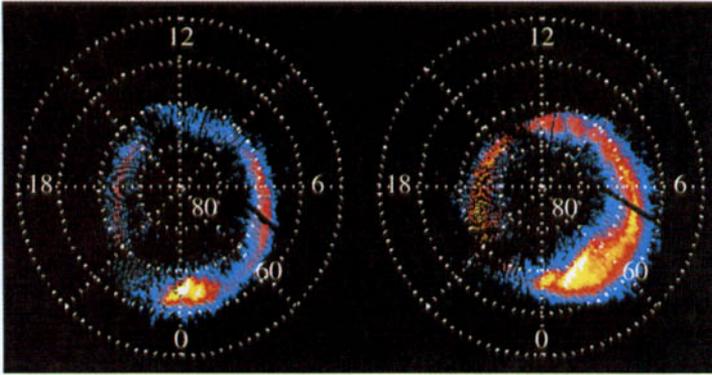


Figure 3.25 - Le satellite POLAR passe au-dessus du pôle Nord et photographie l'ovale auroral à 3 heures 37 (Temps Universel) à gauche, puis une cinquantaine de minutes plus tard, lors d'une orbite suivante. Les images sont prises dans l'ultraviolet. On a fait figurer les heures locales sur cette représentation (12 signifie midi, juste en face du Soleil). On voit une extraordinaire expansion de l'ovale vers 1 heure du matin (local) (crédit POLAR/NASA).

La perte d'un satellite de communications sous l'œil vigilant des chercheurs est une révélation pour le public. Aux seuls Etats-Unis, une dizaine d'émissions de télévisions en parlent sur des chaînes aussi prestigieuses que CNN ou CBS. Plus de trente quotidiens en font de gros titres à travers le monde. En France, Libération, avec son sens poussé de la mise en valeur et du raccourci journalistique titre le 4 février : "SOHO démasque une éruption solaire." Le Point de la même semaine décrit la "tornade solaire" qui vient de se produire.

Cet événement, rare sans être exceptionnel, permet au monde de réaliser à quel point nous sommes vulnérables aux colères du Soleil. A quel point la météorologie de demain sera celle de l'espace.

3.2. UNE SCIENCE À CONSTRUIRE ET SES APPLICATIONS

La météorologie de l'espace doit prévoir et quantifier les émissions de particules et de rayonnement solaire, la réaction géophysique de la magnétosphère et de l'atmosphère, et les incidences possibles sur l'environnement technologique humain. Vue du monde scientifique, elle n'est pas un simple avatar de l'aéronomie mais bien une branche nouvelle de l'astrophysique, aux retombées incalculables²⁶.

²⁶ Certains s'y essaient cependant. Par exemple, interrompre la construction de la Station Spatiale Internationale coûterait 500 millions d'Euros. Le prix du remplacement d'un spatio-naute est de 100 millions d'Euros. On estime qu'une météorologie de l'espace opérationnelle ferait économiser quelques centaines de millions d'Euros par an au développement spatial mondial. De tels nombres bruts et parfois apparemment cyniques sont indispensables aux décideurs politiques et industriels avant de lancer un programme de météorologie de l'espace.

A terme, les services offerts par la météorologie classique trouveront leur pendant pour l'espace : prévisions télévisées et radiodiffusées, sites Internet, répondeurs téléphoniques... Les scientifiques en sont loin et ils doivent se préparer à subir les sarcasmes d'ordinaire réservés à leurs collègues de la météo classique : "Tiens, ils avaient prévu un champ électrique de 5 millivolts par mètre, et il est de 15 ! Ils se trompent vraiment toujours ces météorologues de l'espace."

Il va falloir acquérir une connaissance du Soleil et de l'environnement magnétique de la Terre d'une précision inégalée. Trouver comment prédire les événements solaires qui prennent naissance sur la face cachée du Soleil et qui, l'astre tournant, risquent de menacer notre planète. Il faut trouver les indices de cette activité, un ou plusieurs indices pour le flux de photons, d'autres pour les particules, d'autres pour l'interaction avec le magnétisme terrestre, d'autres encore pour l'activité aurorale, pour celle de l'anneau de courant et des ceintures de radiations. Certains sont déjà bien connus. Le nombre de taches solaires, enregistré depuis 1700 environ, en est un. Depuis 1947, la mesure du flux solaire à 10,7 centimètres de longueur d'onde reflète à peu près fidèlement l'activité globale de l'étoile. Les variations du champ magnétique à haute ou basse latitude sont connues et analysées depuis 1868. Cependant, ces paramètres globaux ne fournissent pas avec la précision requise une connaissance quantitative fine des phénomènes.

Par exemple, on sait partiellement *décrire*, mais pas du tout *prédire* le champ magnétique solaire avec ses diverses irrégularités, ni surtout le déclenchement des éjections de masse coronale. Il en va de même du flux de photons, et pour ce qui concerne la vie sur Terre, en particulier dans l'ultraviolet et le rayonnement X. Dans le milieu interplanétaire, on ne sait pas mettre de chiffre sur la pression dynamique du vent solaire ou le champ magnétique interplanétaire qui y est gelé. En conséquence, il n'est pas encore possible de déterminer à l'avance la position de la magnétopause, ce bouclier magnétique : est-elle en deçà ou au-delà de l'orbite des satellites géostationnaires ?

Les caractéristiques des ceintures de radiations sont également mal connues. Elles dépendent de surcroît du rayonnement cosmique de l'ensemble des autres étoiles, qu'il faut également surveiller.

Les phénomènes d'entrée des particules solaires dans la magnétosphère sont mal compris : l'ouverture côté jour lorsque le champ magnétique solaire s'inverse n'est qu'un modèle, une hypothèse qui résiste mieux aux faits que d'autres. La connaissance de la porosité de la paroi magnétosphérique ou des collisions de la zone de reconnexion côté nuit est relativement pauvre, faute d'observations. Dans la magnétosphère se produit une forte accélération des particules qui va générer les précipitations aurorales. Son mécanisme est mal évalué. Il faut également mettre des valeurs derrière les perturbations électromagnétiques qui traversent toute la magnétosphère, de façon à prévoir l'ampleur des aurores polaires – qui peuvent descendre en latitude jusqu'en Angleterre – et surtout la puissance des courants qui vont être induits dans nos réseaux électriques.

On appréhende mal la haute atmosphère elle-même. Les météorologues savent aujourd'hui prévoir une chute de neige quatre jours à l'avance, donnant une limite pluie-neige d'une précision stupéfiante, avec un indice de confiance de 3 sur 5. Il est hors de question de gloser sur les échecs de cette science : le savoir-faire mis en œuvre dépasse de très loin celui des pauvres météorologues spatiaux ! On est en effet incapables de prédire, et même de dire en temps réel, à quoi ressemblent les profils en altitude des concentrations d'oxygène, d'azote ou d'hydrogène, leur température, leur vitesse. Les résultats seraient encore plus catastrophiques si l'on nous demandait, à l'heure actuelle, de décrire les profils d'ions et d'électrons au-dessus de 70 kilomètres d'altitude : ils varient bien trop rapidement pour se plier aux modèles actuels.

Par ailleurs, et ce n'est pas le moindre des problèmes, les modèles actuels sont des outils de recherche, et les logiciels utilisés des prototypes. Il est fait appel à des modèles internationaux de description de l'atmosphère²⁷, mis au point à partir de moyennes sur des données venant de tous horizons, et absolument inadaptées à la description de ce qui se passe au-dessus de nos têtes dans les cas les plus dramatiques.



Figure 3.26 - Le centre de prévisions de météorologie de l'espace, à Boulder, dans le Colorado

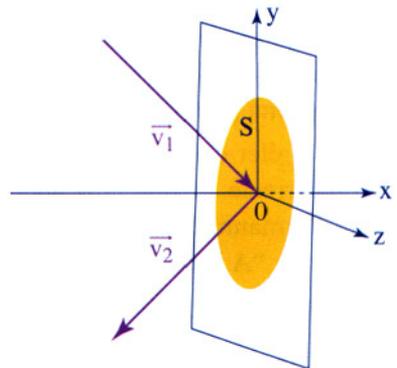
Il est donc nécessaire de développer de nouveaux instruments de mesure, de progresser dans la compréhension physique des phénomènes par l'habituelle osmose entre la modélisation et l'expérimentation. Il faut centraliser les observations des satellites et des radars dans des réseaux internationaux, modéliser, optimiser les programmes de prédiction et mettre les informations à la disposition de tous. Sur ce thème comme sur d'autres, le physicien doit poursuivre sa recherche pour mieux comprendre le monde dans lequel nous vivons. D'ailleurs, bientôt, les dirigeants, les médias et bien d'autres... trouveront anormal de ne pas savoir tout de suite si l'indice 225 X d'orage magnétique passera, dans l'heure qui suit, de 57 à 58. Oui ou non ?

27 Le modèle adopté le plus généralement par les scientifiques s'appelle MSIS. Il est développé par une équipe américaine, mais avec une collaboration internationale. Le CNES possède son propre modèle, DTM.

Annexe 1

DENSITÉ ET ÉNERGIE CINÉTIQUE D'UN GAZ

Il est possible de relier la pression d'un gaz, la température et l'énergie cinétique moyenne du gaz. Etudions tout d'abord la relation qui existe entre pression et énergie cinétique dans le cas simple du gaz parfait. Considérons l'interaction entre une particule de gaz et une surface qui délimite le volume du gaz. Les chocs entre les particules du gaz et la surface sont supposés parfaitement élastiques (sans perte d'énergie). Une particule qui frappe la surface avec une vitesse \vec{v}_1 repart avec une vitesse \vec{v}_2 telle que $v_{2x} = -v_{1x}$, $v_{2y} = v_{1y}$ et $v_{2z} = v_{1z}$. La variation de la quantité de mouvement de la particule dans le choc est $2m v_x$ (m est la masse de la particule, et v_x la norme de v_{1x} et v_{2x}). Et, de par l'équation fondamentale de la dynamique, la surface S sur laquelle se produit le choc subit pendant le temps du choc δt une force F_x suivant la normale Ox à la surface telle que :



$$F_x \delta t = 2 m v_x$$

Si n est le nombre de particules par unité de volume et si toutes les particules ont la même valeur de v_x , le nombre de chocs pendant δt sur la surface colorée S est :

$$\frac{n S v_x \delta t}{2}$$

Ce nombre correspond aux particules présentes dans le cylindre de base S et de hauteur $v_x dt$. La division par 2 provient du fait que, dans un gaz à l'équilibre, les particules partent de façon identique dans toutes les directions. Donc on trouve autant de particules allant vers les x négatifs que de particules allant vers les x positifs, et seules ces dernières nous intéressent ici. La pression par unité de surface s'écrit :

$$P = n m v_x^2$$

Bien sûr, les particules n'ont pas toutes la même vitesse et on tient compte de cette réalité en considérant la moyenne de ces forces donc la moyenne de v_x^2 , c'est-à-dire la vitesse quadratique moyenne $\overline{v_x^2}$.

Ainsi la pression d'un très grand nombre de particules N dans un volume V s'écrit :

$$P = \frac{N}{V} \left(m \overline{v_x^2} \right) = \frac{1}{3} \frac{N}{V} \left(m \overline{v^2} \right)$$

Puisque si v est la vitesse des particules, en moyenne les composantes suivant les trois directions Ox , Oy , Oz respectent une distribution isotrope, et :

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$$

On peut finalement écrire :

$$PV = \frac{N}{3} m \overline{v^2} = \frac{2}{3} \left(N m \frac{\overline{v^2}}{2} \right) = \frac{2}{3} U$$

où U est l'énergie cinétique moyenne de l'ensemble des particules, c'est-à-dire l'énergie interne du système. Nous n'avons pas tenu compte ici des contributions dans l'énergie interne du gaz provenant de la rotation, de la vibration des particules, des interactions entre elles, mais l'énergie de translation considérée rend bien compte des phénomènes qui nous préoccupent.

Pour corrélérer cette énergie cinétique moyenne d'une particule et la température de façon correcte, on doit faire appel à la mécanique statistique et à la loi de distribution de Boltzmann. Se démontre ainsi le théorème de l'équipartition de l'énergie cinétique : "A l'équilibre, l'énergie cinétique moyenne pour chaque molécule est, par degré de liberté, égale à $\frac{1}{2} k_B T$ " (k_B constante de Boltzmann vaut dans le Système International $1,38066 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$; elle est le rapport entre la constante des gaz parfaits $R = 8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et le nombre d'Avogadro $\mathcal{N} = 6,0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$). Puisque dans un gaz à l'équilibre thermodynamique, les particules peuvent se déplacer dans trois directions, donc avec trois degrés de liberté, l'énergie cinétique moyenne de chaque molécule¹ est $\frac{3}{2} k_B T$.

Ecrire l'énergie cinétique moyenne d'une molécule $\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k_B T$ permet de retrouver la loi des gaz parfaits $PV = \frac{2}{3} \mathcal{N} \left(\frac{3}{2} k_B T \right) = \mathcal{N} k_B T = RT$ (pour une mole).

Mais on constate surtout qu'à une température correspond une vitesse. Cette correspondance a été démontrée ici à l'aide d'un modèle qui met en jeu un très grand nombre de molécules, de particules. C'est aussi cette relation qui permettra ultérieu-

1 Si le lecteur désire approfondir ces notions, nous lui recommandons l'ouvrage *Introduction à la mécanique statistique* d'Elie BELORIZKY et Wladimir GORECKI, dans la même collection, et les ouvrages de probabilités et statistiques du même auteur (E. B.).

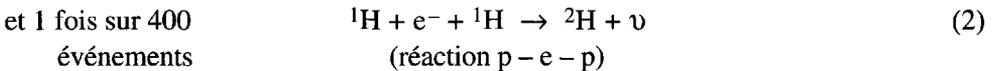
rement, lorsque nous allons considérer des particules très isolées dans l'espace, c'est-à-dire dans un contexte où le concept de pression devient plus délicat à appréhender, de lier encore très directement $\overline{v^2}$ et T. Le module de la vitesse de la particule et la température évaluée pourront en première approximation être encore liés par la relation $T = \frac{m \overline{v^2}}{3k_B}$, si les trois degrés de liberté sont possibles.

Annexe 2

LES PROCESSUS NUCLÉAIRES INTERNES DU SOLEIL

Dans la région centrale du Soleil, la température calculée à l'aide des modèles doit être d'environ 15 millions de degrés et la pression 221 milliards de fois la pression atmosphérique. Dans cette région du cœur, l'hydrogène se transforme en hélium en produisant de l'énergie. C'est pour cette raison que la proportion massique d'hydrogène n'est plus que de 40% au centre du Soleil, alors qu'elle est de 74% en surface. Les modèles actuels indiquent que deux cycles de réactions nucléaires prédominent dans ces transformations : le cycle proton-proton et le cycle de Bethe-Weizsäcker ou cycle du carbone-azote.

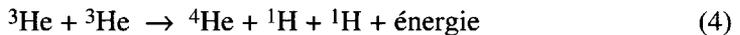
Le cycle proton-proton est réalisé à partir d'une température de 5 millions de degrés. Il commence par la réaction d'électrons et de protons entre eux qui donnent des atomes de deutérium ^2H , des positons e^+ et des neutrinos ν :



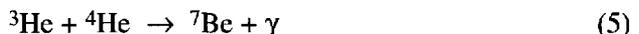
Chaque deutérium va s'unir à un nouveau proton pour former de l'hélium 3, noté ^3He , et un rayonnement γ :



Les ^3He ainsi formés fusionnent dans 91% des cas pour donner un noyau d'hélium 4, noté ^4He , et libérer des protons ainsi qu'une importante énergie ($4,2 \times 10^{12}$ joules par réaction (4) élémentaire, ou encore 25 mégaélectronvolts) :



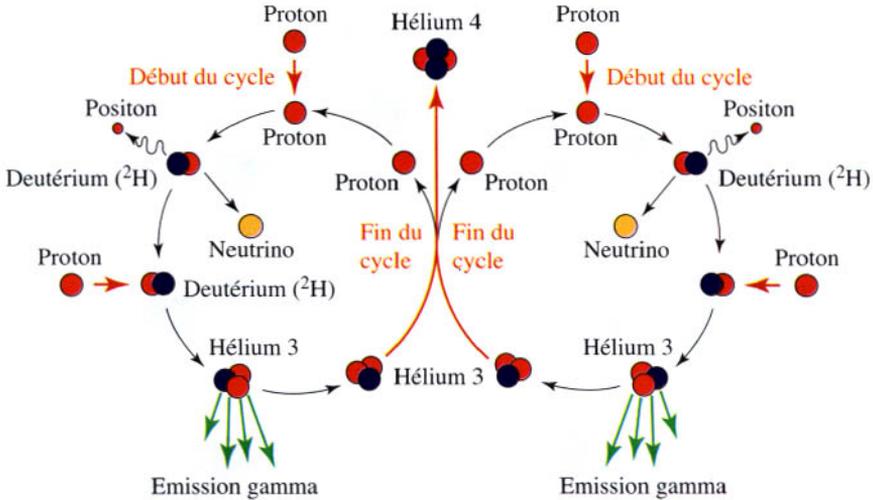
Dans 9% des cas, l'hélium 3 et l'hélium 4 réagissent pour donner du béryllium et du rayonnement γ :



Le béryllium absorbe ensuite un électron pour former du lithium, excité dans 10% des cas :



Dans la plupart des cas, ce lithium fusionne alors avec un proton, donnant naissance à des atomes d'hélium 4 :



Le second cycle, proposé par Bethe et Weizsäcker, est aussi appelé *cycle du carbone-azote* car il se réalise par la production de ces éléments lourds. Il ne peut se produire que lorsque la température est supérieure à 9 millions de degrés et n'est responsable que d'une partie minoritaire de l'énergie solaire. Toutefois il devient primordial au-dessus de 16 millions de degrés, ce qui fait de lui l'origine principale d'énergie de certaines étoiles. Il débute par l'action du carbone, résidu d'explosions d'une supernova, sur un proton :



L'azote ${}^{13}\text{N}$ est instable et se transforme en carbone ${}^{13}\text{C}$ en perdant un positon et un neutrino :



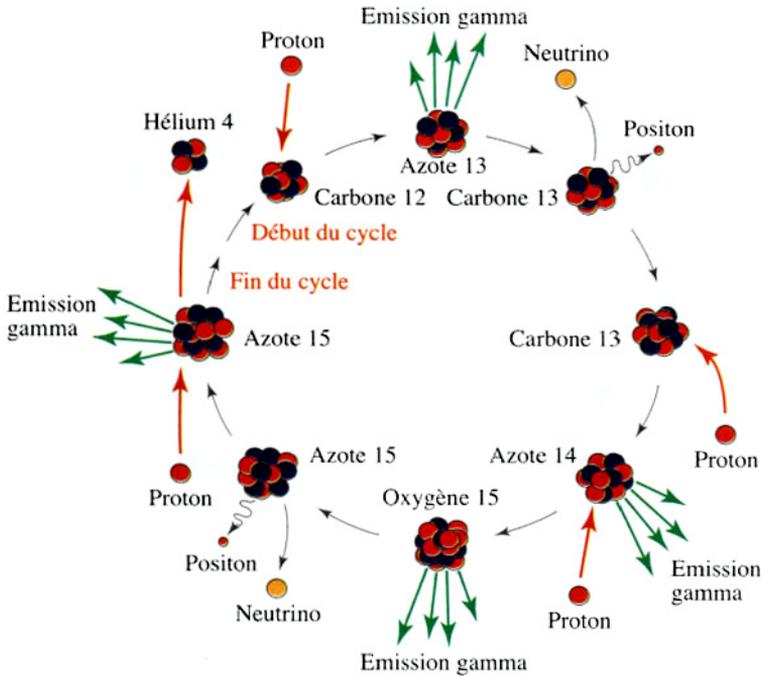
Des captures successives de protons nous conduisent à l'oxygène ${}^{15}\text{O}$:



L'oxygène ${}^{15}\text{O}$ instable va se dissocier spontanément en azote ${}^{15}\text{N}$, qui fusionne avec un proton, pour donner finalement de l'hélium et du carbone :



Ainsi le carbone n'est ni consommé ni produit, il sert en quelque sorte de catalyseur au cycle de Bethe, puisqu'il est rendu à la fin et peut être à nouveau réutilisé. Le cycle de Bethe peut ainsi être très important dans une étoile avec peu de carbone.



Les deux cycles se déroulent en des temps moyens très différents : 336 millions d'années pour le cycle de Bethe et 16 milliards d'années pour le cycle proton-proton. Les réactions ont lieu simultanément, ce qui entraîne une perte de masse du Soleil de 4,2 millions de tonnes par seconde, transformée en énergie. Depuis sa naissance, il y a 4,6 milliards d'années, le Soleil a perdu seulement 3% de sa masse initiale. Le Soleil ne mourra pas de cette perte de masse mais, comme décrit au chapitre 1, de l'emballement des réactions nucléaires après épuisement de l'hydrogène (dans 5 milliards d'années).

Annexe 3

LE CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Une charge électrique ponctuelle q **immobile** crée dans tout l'espace un champ électrique \vec{E} ($\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \frac{\vec{r}}{r^3}$ où ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide égale à $8,8542 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ dans le Système International ; \vec{r} définit la position du point considéré par rapport à la charge).

Une charge q **qui se déplace** à la vitesse \vec{v} crée en tout point de l'espace un champ magnétique \vec{B} ($\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \vec{v} \wedge \frac{\vec{r}}{r^3}$ avec μ_0 perméabilité magnétique du vide égale à $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ dans le Système International). On utilise souvent dans ce livre pour \vec{B} l'appellation de champ magnétique. Rigoureusement le champ magnétique est \vec{H} , et \vec{B} , induction magnétique, est égale à $\mu_0 \vec{H}$ dans le vide. Mais la distinction entre \vec{B} et \vec{H} n'est en fait importante que dans une matière condensée aimantée, et cette appellation abusive s'est généralisée en géophysique.

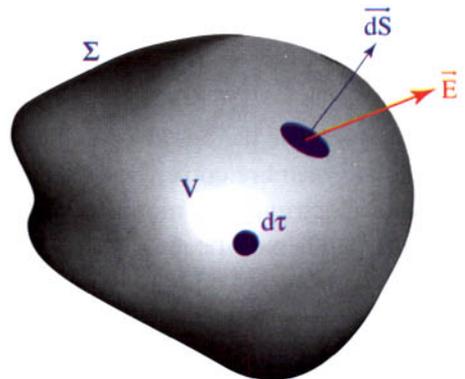
Le champ électromagnétique est une entité qui comprend un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} indivisibles. Définir ce champ électromagnétique et ses variations nécessite la connaissance des équations de Maxwell qui, dans le vide, s'énoncent comme suit :

$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ est l'équation de Poisson, où

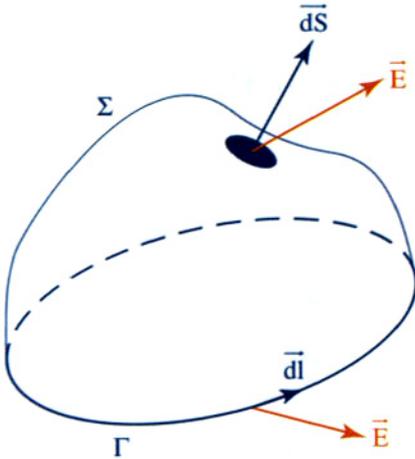
ρ est la densité de charge volumique. On comprend mieux sa signification à l'aide du théorème d'Ostrogradsky :

$$\iiint_V \text{div } \vec{E} \, d\tau = \iint_{\Sigma} \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Celui-ci exprime que le flux d'un vecteur \vec{E} à travers une surface fermée Σ est égal à l'intégrale des divergences du vecteur dans chaque petit volume $d\tau$, intégrale calculée



sur tout le volume V entouré par Σ . Dans le cas qui nous concerne, cela signifie que, si le volume V ne contient aucune charge ($\rho = 0$), le flux du champ \vec{E} à travers Σ est nul : soit \vec{E} est nul, soit le flux entrant de \vec{E} dans V est égal au flux sortant. Vous avez reconnu ce que l'on appelle aussi le théorème de Gauss.



$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ est l'équation de Faraday.}$$

Sa signification apparaît plus clairement à l'aide du théorème de Stokes :

$$\iint_{\Sigma} \text{rot } \vec{E} \cdot \vec{dS} = \int_{\Gamma} \vec{E} \cdot \vec{dl}$$

On constate que la circulation du vecteur champ électrique \vec{E} le long d'un circuit fermé Γ est égale au flux du vecteur $\text{rot } \vec{E}$ à travers n'importe quelle surface Σ s'appuyant sur Γ .

L'équation de Faraday s'écrit aussi :

$$\int_{\Gamma} \vec{E} \cdot \vec{dl} = \iint_{\Sigma} \text{rot } \vec{E} \cdot \vec{dS} = -\iint_{\Sigma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{dS} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Sigma} \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

qui fait clairement apparaître le flux de \vec{B} à travers la surface Σ . On retrouve la loi de Lenz qui indique qu'une variation du flux magnétique à travers un circuit induit une différence de potentiel électrique dans ce circuit. L'équation de Faraday est une équation locale, donc vraie en chaque point. Elle exprime que la variation au cours du temps du champ magnétique ($\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ non nul) crée un champ électrique \vec{E} .

$\text{div } \vec{B} = 0$ exprime la conservation du flux magnétique, c'est-à-dire le fait que si l'on place une surface fermée Σ dans une région de l'espace où existe un champ magnétique, le flux de \vec{B} est nul à travers Σ (il entre à travers Σ dans le volume qu'elle définit autant de lignes de champ qu'il en sort).

$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$ est le *théorème de Maxwell-Ampère*, où \vec{j} est la densité

de courant créée par des charges électriques libres en mouvement. Le premier terme du second membre correspond au classique théorème d'Ampère et exprime que des charges électriques en mouvement créent un champ magnétique. Le second terme signifie que la modification d'un champ électrique au cours du temps crée un champ magnétique et, ce, même si dans la région de l'espace étudiée n'existent pas de charges en mouvement.

Les quatre équations de Maxwell sont utilisées, ainsi que des relations classiques d'analyse vectorielle, pour aboutir finalement aux équations suivantes :

$$\overline{\Delta \mathbf{E}} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \overline{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \overline{\mathbf{j}}}{\partial t} + \overline{\text{grad}} \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\overline{\Delta \mathbf{B}} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \overline{\mathbf{B}}}{\partial t^2} = -\mu_0 \overline{\text{rot}} \overline{\mathbf{j}}$$

Ces équations se simplifient notablement en absence de charges fixes (ρ) ou mobiles ($\overline{\mathbf{j}}$) et prennent une forme caractéristique d'équation de propagation d'une onde à la vitesse c avec $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$:

$$\overline{\Delta \mathbf{E}} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \overline{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = 0$$

$$\overline{\Delta \mathbf{B}} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \overline{\mathbf{B}}}{\partial t^2} = 0$$

La solution générale d'équations de ce type est une onde sinusoïdale de type, par exemple pour le champ $\overline{\mathbf{E}}$:

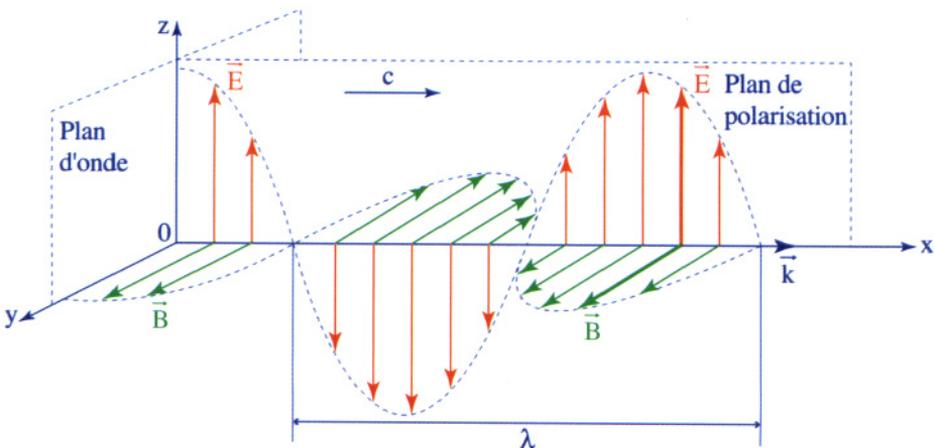
$$\overline{\mathbf{E}} = \overline{\mathbf{E}}_0 \cos(\omega t - \overline{\mathbf{k}} \cdot \overline{\mathbf{r}})$$

où ω est la pulsation et $\overline{\mathbf{k}}$ le vecteur d'onde qui définit le sens de la propagation de l'onde, et dont la norme est égale à $\frac{2\pi}{\lambda}$ (λ longueur d'onde). Dans le cas très simple d'une propagation qui s'effectue seulement suivant un seul axe, par exemple celui de l'abscisse x , les équations de propagation deviennent :

$$\frac{\partial^2 \overline{\mathbf{E}}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \overline{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 \overline{\mathbf{B}}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \overline{\mathbf{B}}}{\partial t^2} = 0$$

Les solutions pour $\overline{\mathbf{E}}$ et $\overline{\mathbf{B}}$, illustrées sur la figure, s'écrivent :

$$\overline{\mathbf{E}} = \overline{\mathbf{E}}_0 \cos(\omega t - kx) \quad \text{et} \quad \overline{\mathbf{B}} = \overline{\mathbf{B}}_0 \cos(\omega t - kx)$$



Dans la figure, le vecteur \vec{E} est situé dans le plan vertical xOz et le vecteur \vec{B} dans le plan horizontal xOy . En effet, les équations de Maxwell dans le vide permettent d'écrire \vec{B} en fonction de \vec{E} :

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} \wedge \vec{E}$$

d'où l'on déduit le rapport entre B_0 et E_0 ($B_0 = \frac{E_0}{c}$). On constate que l'onde électromagnétique est une onde transverse : les grandeurs qui se propagent (\vec{E} et \vec{B}) sont des vecteurs perpendiculaires à la direction de propagation définie par \vec{k} . En outre, \vec{B} est perpendiculaire à \vec{E} puisque \vec{k} , \vec{E} et \vec{B} forment un trièdre direct.

Par la suite, on se souviendra que \vec{B} et \vec{E} sont indissociables et que, dans tous les cas, tout déplacement de particules chargées crée une onde électromagnétique, un champ électromagnétique.

Annexe 4

CHAMP MAGNÉTIQUE DIPOLAIRE

Soient des particules de diverses espèces, c'est-à-dire électriquement neutres, ou chargées négativement (électrons) ou chargées positivement (ions), en mouvement. Un flux de particules de charge q_s animées d'une vitesse moyenne \vec{v}_s peut être caractérisé par une densité de courant $\vec{j}_s = n_s q_s \vec{v}_s$, où n_s est la concentration, nombre de particules par unité de volume. Si plusieurs espèces de particules rentrent en jeu, la densité de courant totale en un point pourra s'écrire :

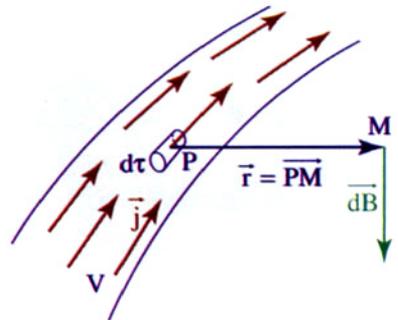
$$\vec{j} = \sum_s n_s q_s \vec{v}_s$$

en faisant la somme de toutes les contributions. Dans les milieux géophysiques, on trouve essentiellement des plasmas neutres constitués d'ions monochargés et d'électrons. Alors, la concentration en ions et en électrons est la même (n_e) et \vec{j} peut s'écrire :

$$\vec{j} = e n_e (\vec{v}_i - \vec{v}_e)$$

e étant la charge de l'électron ($e = 1,6 \times 10^{-19}$), \vec{v}_e la vitesse moyenne des électrons et \vec{v}_i celle des ions (dans le cas simple d'une seule famille d'ions). On constate que la densité de courant a le même sens que celui du déplacement des ions positifs et le sens inverse de celui du déplacement des électrons. Nous allons par la suite conserver la notion de densité de courant \vec{j} , sans oublier qu'elle est le résultat de mouvements relatifs plus ou moins complexes de particules chargées.

Les charges électriques créent un champ électrique, et les charges électriques en mouvement créent en outre un champ magnétique. Ainsi une distribution de densité de courant \vec{j} , à l'intérieur d'un volume V , crée en tout point M de l'espace défini par sa position \vec{r} un champ \vec{B} donné par la **loi de Biot et Savart** :



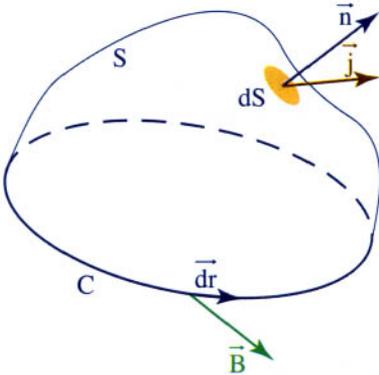
$$\vec{B} = \int_V \overline{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j} d\tau \wedge \vec{r}}{r^3}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$$

L'intégration s'effectue sur tous les éléments $d\tau$ parcourus par \vec{j} dans le volume V . On constate que, de par sa définition, \vec{B} n'obéit pas aux règles de symétrie des vecteurs polaires tels que \vec{r} ou \vec{j} . Il se comporte comme un vecteur axial, comme par exemple le vecteur $\vec{\omega}$ de rotation d'un solide sur lui-même.

Nous avons présenté en annexe 3 les équations de Maxwell. Revenons sur deux d'entre elles pour expliciter, de façon générale, les meilleures méthodes de détermination du champ suivant la complexité et la symétrie d'une distribution de courants.

Tout d'abord, le **théorème d'Ampère** permet de relier localement le champ magnétique et la densité de courant. Le théorème d'Ampère exprime l'égalité entre la circulation de \vec{B} sur un parcours fermé C et le flux du vecteur densité de courant \vec{j} à travers toute surface fermée S qui s'appuie sur C :



$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \iint_S \vec{j} \cdot \vec{n} \, dS$$

où \vec{n} est la normale orientée à un petit élément dS de S . Les relations d'analyse vectorielle, et notamment le théorème de Stokes, nous permettent d'écrire :

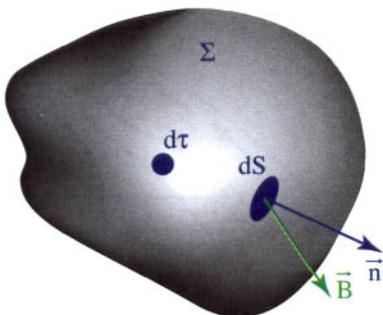
$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \iint_S \overline{\text{rot } \vec{B}} \cdot \vec{n} \, dS$$

donc

$$\overline{\text{rot } \vec{B}} = \mu_0 \vec{j}$$

Il est également possible, en utilisant la loi de Biot et Savart, de démontrer une seconde équation

donnée en annexe 3, et qui exprime le fait que le calcul du flux \vec{B} à travers une surface fermée Σ donne un résultat nul (**conservation du flux**) :



$$\iint_{\Sigma} \vec{B} \cdot \vec{n} \, dS = 0$$

qui, à l'aide du théorème d'Ostrogradsky, permet d'écrire :

$$\iiint_V \text{div } \vec{B} \, d\tau = 0$$

V étant le volume contenu dans la surface Σ . On obtient ainsi l'équation locale :

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

En utilisant encore les relations classiques d'analyse vectorielle, on déduit de $\text{div} \vec{B} = 0$ que le champ magnétique \vec{B} dérive d'un potentiel vecteur \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$$

Pour calculer \vec{B} en tout point de l'espace, on pourra donc soit effectuer des intégrales en utilisant la formule de Biot et Savart, soit utiliser le théorème d'Ampère, soit passer par le potentiel vecteur \vec{A} qui s'écrit dans le cas général :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j} \, d\tau}{r}$$

Nous avons maintenant les outils nécessaires ; considérons le cas physique qui nous intéresse souvent sur le Soleil ou la Terre, celui de charges électriques décrivant des trajets quasi circulaires que l'on représente par des densités de courant \vec{j} en circuit fermé.

On définit le moment magnétique \vec{m} tel que :

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \int_V \vec{r} \wedge \vec{j} \, d\tau$$

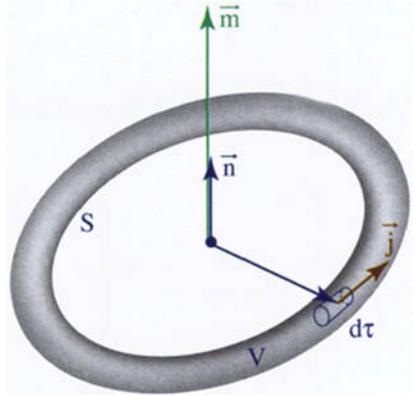
qui peut s'exprimer, si on résume la distribution de courant, par un courant I filiforme (avec $I d\vec{l} = \vec{j} \, d\tau$) :

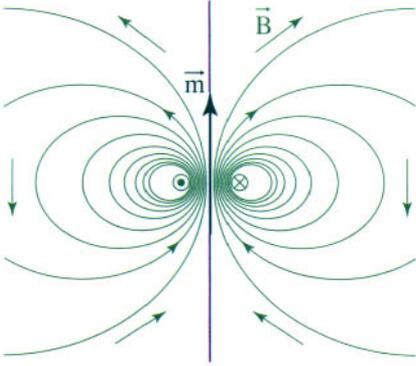
$$\vec{m} = IS \vec{n}$$

S est la surface définie par la boucle de courant et le vecteur unitaire \vec{n} est orienté de telle sorte que, de \vec{n} , on voit le courant tourner dans le sens trigonométrique. On utilise les relations présentées auparavant et on obtient, en se plaçant en un point M suffisamment éloigné de la boucle de courant dont la position est définie par \vec{r} :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m} \wedge \vec{r}}{r^3} \quad \text{et} \quad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{m} \wedge \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right]$$

Ces formules sont utiles pour des ensembles assez compliqués de distributions de courants puisque l'intégrale permettant le calcul de \vec{m} en rend compte. Toutefois, les résultats pour \vec{B} et \vec{A} n'ont de sens que si \vec{r} est grand devant les dimensions du volume V . Dans ce cas, le champ \vec{B} a une symétrie dans un plan passant par \vec{m} et la figure ci-après donne les lignes de champ \vec{B} dans un tel plan. Sont représentés le moment magnétique \vec{m} et les intersections, dans le plan de la figure, d'une boucle de courant qui résumerait les distributions de courant.





Le champ \vec{B} représenté en coordonnées polaires, avec pour origine le moment magnétique \vec{m} , s'exprime par ses composantes :

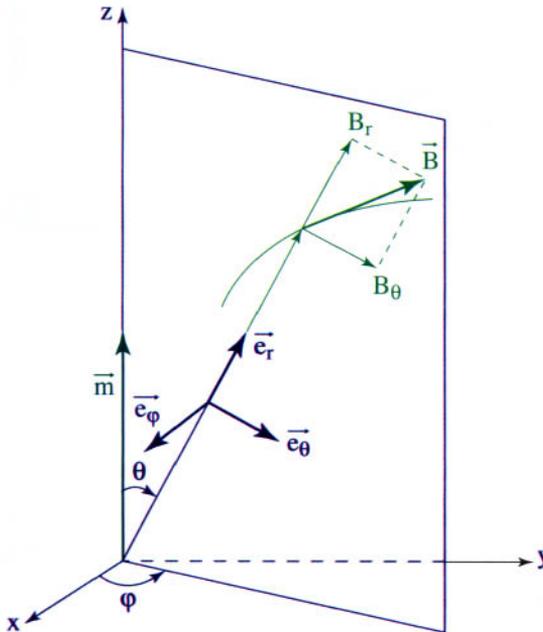
$$B_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m \cos \theta}{r^3}$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \sin \theta}{r^3}$$

$$B_\varphi = 0$$

On voit que le module de B est donné par :

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \left[1 + 3 \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}}$$



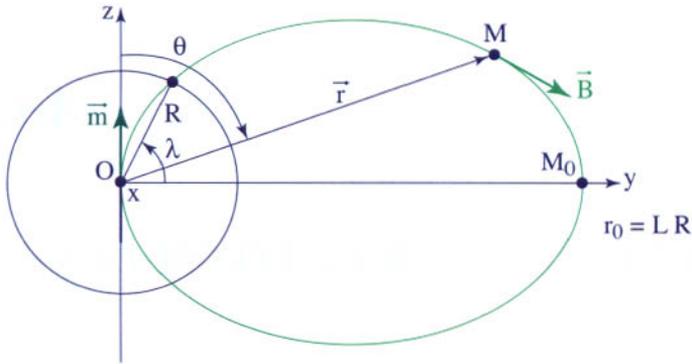
Comme \vec{B} est par définition tangent aux lignes de champ, leur équation se calcule aisément :

$$\frac{r d\theta}{dr} = \frac{B_\theta}{B_r} \quad \text{soit} \quad \frac{dr}{r} = \frac{2 \cos \theta d\theta}{\sin \theta}$$

ou en intégrant entre la valeur $\theta = \frac{\pi}{2}$ en M_0 et la valeur de θ en M :

$$\int_{r_0}^r \frac{dr'}{r'} = \log \frac{r}{r_0} = \int_{\frac{\pi}{2}}^\theta \frac{2 \cos \theta' d\theta'}{\sin \theta'} = 2 \log |\sin \theta| \quad \text{soit} \quad r = r_0 \sin^2 \theta$$

r_0 est la distance entre l'origine et le point M_0 où la ligne de champ \vec{B} coupe le plan xOy .



Les résultats précédents permettent de relier lignes de champ et champ magnétique à la surface d'une planète sphérique de rayon R . Par exemple, la ligne de champ qui traverse le plan équatorial en $r_0 = 4R$ a traversé la surface de la planète à une latitude λ (dans le repère géomagnétique) telle que :

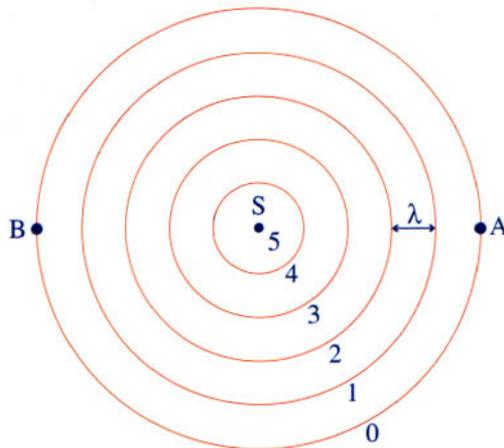
$$R = 4R \sin^2 \theta \quad \text{d'où} \quad \lambda = 60^\circ$$

Nous utiliserons ces relations en annexe 14 pour décrire le champ magnétique terrestre. Le résultat le plus important est sans doute la décroissance en $\frac{1}{r^3}$ du champ magnétique \vec{B} créé par un moment magnétique. C'est la même décroissance que celle obtenue pour le champ électrique créé par un dipôle électrique, d'où l'appellation de champ dipolaire.

Annexe 5

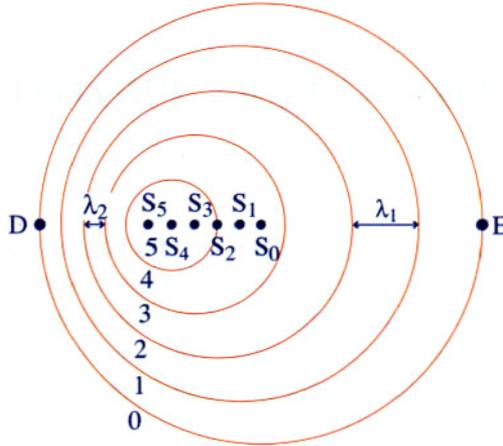
EFFET DOPPLER ET LONGUEUR D'ONDE

Nous allons considérer une source S d'ondes électromagnétiques. Elle émet une onde comme celle représentée en annexe 3 avec, pour fixer les idées, le champ électrique en permanence perpendiculaire à la feuille et variant de façon sinusoïdale : l'amplitude est parfois maximale vers nous, puis elle décroît jusqu'à s'annuler, devient maximale vers le fond de la feuille, s'annule à nouveau et redevient maximale vers nous. Nous considérerons que la situation "maximale vers nous" permet de repérer l'avancée de l'onde.



Dans la figure ci-dessus, la source S est immobile et émet depuis un temps de $5T$ (T est la période de l'onde). Nous avons représenté sur la figure les lieux où se trouvent les valeurs maximales du champ électrique orienté vers nous (ce sont des cercles, traces de sphères sur notre feuille ; pourquoi des sphères ? Parce que le milieu étant isotrope, l'onde se déplace à la même vitesse dans toutes les directions). L'onde de référence émise en $t = 0$ est maintenant à une distance $c \times 5T$, soit $5cT$ ou 5λ , c'est-à-dire sur une sphère de rayon 5λ . Nous avons représenté l'intersection de cette sphère avec la feuille par le cercle indiqué 0. L'onde émise en $t = T$ est à une distance $c \times 4T$, soit 4λ (représentée par le cercle indiqué 1). De même le petit cercle indiqué 4 correspond à l'émission par S au temps $t = 4T$, et l'onde a eu le temps de parcourir (en $t = 5T$) la distance λ . En $t = 5T$, la source est juste en train d'émettre un champ avec

\vec{E} maximum orienté vers nous. Dans ce contexte, un observateur situé en A reçoit l'information \vec{E} maximum vers nous tous les intervalles de temps T et mesure ainsi la longueur d'onde $\lambda = cT$, qui est la même que celle émise par S. Un observateur situé en B trouve lui aussi le même résultat.



La source S se déplace maintenant suivant l'axe horizontal, vers la gauche à la vitesse v (sur le schéma nous avons choisi $v = \frac{c}{2}$). L'onde émise en $t = 0$ par S en S_0 avec \vec{E} maximum vers nous est en ce moment sur le cercle de centre S_0 et de rayon 5λ indiqué 0 ; l'onde émise en $t = T$, lorsque S était en S_1 , est sur le cercle de centre S_1 et de rayon 4λ indiqué 1 ; l'onde émise en $t = 4T$ est sur le cercle de rayon λ et de centre S_4 , et la source S située en S_5 est en train d'émettre le champ électrique d'amplitude maximale dirigé vers nous. Un observateur situé en E reçoit l'information périodique avec une période plus grande que celle de la source S ou, comme illustré sur la figure, l'onde qu'il reçoit a une longueur d'onde $\lambda_1 = (c + v)T$ plus grande que λ . A l'inverse, l'observateur situé en D reçoit plus souvent l'information ; l'onde possède une longueur d'onde $\lambda_2 = (c - v)T$ plus courte que celle émise par S. Donc la longueur d'onde observée diminue si la source vient vers l'observateur, et augmente si la source s'en éloigne. On a :

$$\lambda_1 = cT + vT = \lambda + vT \quad \text{et} \quad \lambda_2 = \lambda - vT$$

donc $\Delta\lambda = \lambda_{\text{observé}} - \lambda_{\text{émis}} = vT$, avec v positif si la source s'éloigne de l'observateur. $\Delta\lambda$ est positif ou négatif suivant le sens de déplacement de la source. On comprend que cette propriété permet, en étudiant la variation de fréquence ou de longueur d'onde d'une onde émise par une source connue en déplacement, de connaître les variations de sa vitesse.

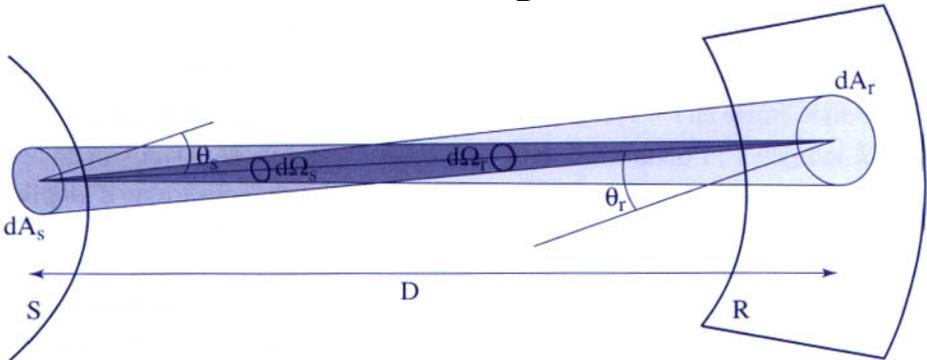
Remarque – La présentation de l'effet Doppler serait plus rigoureuse en décrivant le phénomène avec des ondes acoustiques, et en le généralisant ensuite (correction relativiste).

Annexe 6

GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES

La photométrie est la mesure des énergies émises, propagées, reçues dans le cadre de phénomènes rayonnants. Les grandeurs photométriques sont définies en s'appuyant sur le modèle des rayons lumineux : on considère que le flux d'énergie par unité de temps (en watts) d^2F , émis par un élément dA_s d'une source S et reçu par une surface dA_r d'un récepteur R, est proportionnel à une propriété appelée la luminance L et à l'étendue optique d^2G :

$$d^2F = L dA_s \cos \theta_s \frac{dA_r \cos \theta_r}{D^2} = L d^2G$$



avec

- ♦ θ_s, θ_r angles entre la droite joignant les milieux des surfaces dA_s, dA_r et la normale à ces surfaces ;
- ♦ D distance entre dA_s et dA_r . On pourra définir les angles solides $d\Omega_s$ et $d\Omega_r$, sous lesquels on voit respectivement dA_r et dA_s :

$$d\Omega_s = \frac{dA_r \cos \theta_r}{D^2}$$

et de même

$$d\Omega_r = \frac{dA_s \cos \theta_s}{D^2}$$

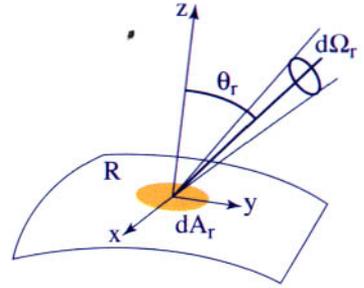
La luminance L est une mesure locale de la densité de flux. C'est une puissance par unité de surface et par unité d'angle solide ; on l'exprime en watts par mètre carré et par stéradian ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$). Toutes les autres grandeurs photométriques se déduisent de L comme indiqué ci-après.

Eclairement

Puissance reçue par élément de surface du récepteur :

$$E(x, y) = \int L_r(\theta_r) \cos \theta_r d\Omega_r \quad (\text{en } \text{W m}^{-2})$$

pour dA_r .

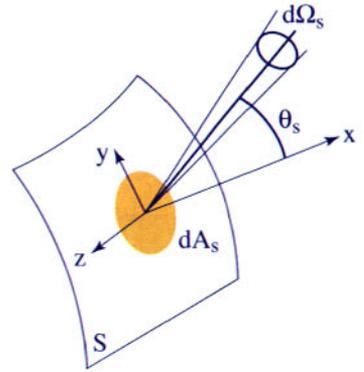


Emittance

Puissance émise par élément de surface de l'émetteur :

$$M(y, z) = \int L_s(\theta_s) \cos \theta_s d\Omega_s \quad (\text{en } \text{W m}^{-2})$$

pour dA_s .

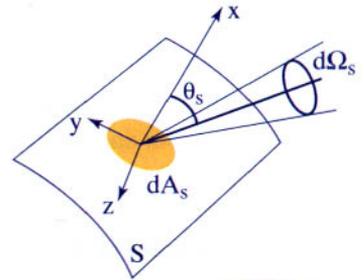


Intensité

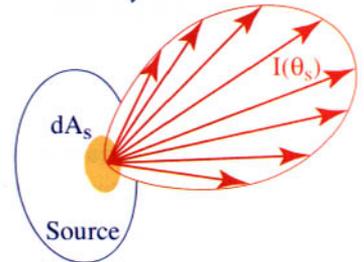
Puissance totale émise par la source dans une direction donnée :

$$I(\text{angles de la direction}) = \int L(y, z) \cos \theta_s dA_s \quad (\text{en } \text{W sr}^{-1})$$

pour dA_s .



La surface constituée par l'ensemble des extrémités du vecteur intensité \vec{I} est appelée l'**indicatrice des intensités**.



On trouvera ces grandeurs dans toutes les notices d'appareils d'optique, avec des unités diverses qui peuvent être classées comme indiqué dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 - Grandeurs et unités

Grandeurs		Unité e	Unité p	Unité ℓ
Flux F		watt (W)	photon s ⁻¹	lumen (ℓ m) 1 ℓ m = 1 cd sr
Luminance (radiance)	$L = \frac{d^2 F}{dG^2}$	W m ⁻² sr ⁻¹	s ⁻¹ m ⁻² sr ⁻¹	cd m ⁻² = nit
Eclairement (irradiance)	$E = \frac{dF_r}{dA_r}$	W m ⁻²	s ⁻¹ m ⁻²	ℓ m m ⁻² = lux
Emittance (excitation ou émission)	$M = \frac{dF_s}{dA_s}$	W m ⁻²	s ⁻¹ m ⁻²	ℓ m m ⁻²
Intensité	$I = \frac{dF_s}{d\Omega_s}$	W sr ⁻¹	s ⁻¹ sr ⁻¹	candela (cd)
Quantité de lumière (énergie lumineuse)	$\theta = \int F dt$	joule (J)	nombre de photons	ℓ m s ⁻¹
Exposition	$\xi = \int E dt$	J m ⁻²	m ⁻²	lux s

Plusieurs types d'unités sont utilisées :

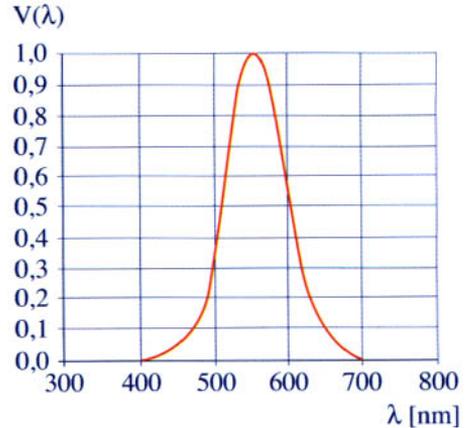
- ♦ les unités issues du Système International habituel souvent exprimées avec l'indice e (pour énergétique) ;
- ♦ les unités dites photoniques (p) où sont comptabilisés les photons et non leur énergie. Ces unités sont utilisées par les scientifiques qui travaillent avec des flux de rayonnement de très faible puissance : ils ont pris l'habitude de compter les photons d'une longueur d'onde déterminée qu'ils connaissent déjà ;
- ♦ les unités lumineuses qui expriment les sensations ressenties par l'œil humain (indice ℓ ou indice v pour lumineux ou visuel). Les valeurs lumineuses (ℓ ou v) sont déterminées par rapport à la distribution spectrale en unités SI (indice e) en fonction de la variation de courbe de réponse de l'œil. Par exemple une source lumineuse très intense dans l'ultraviolet ou dans l'infrarouge ne donnera aucune valeur en unités lumineuses. Donnons tout d'abord la courbe de réponse de l'œil en lumière intense (courbe photopique). Il est convenu de représenter ce que l'on appelle l'efficacité lumineuse photopique par la grandeur sans dimension V qui varie entre 0 (aucune sensation visuelle) et 1 (sensibilité maximale de l'œil). On constate que l'œil est très sensible à des longueurs d'onde d'environ 0,56 micro-

mètres, c'est-à-dire dans le vert-jaune. La grandeur visuelle se déduira de la grandeur énergétique en multipliant celle-ci par $V(\lambda)$, et par un coefficient dépendant de l'unité choisie.

Tableau 6.2 - Efficacité lumineuse photopique de l'œil

Longueur d'onde (nm)	Efficacité lumineuse photopique $V(\lambda)$
380	0.00004
390	1.00012
400	0.0004
410	0.0012
420	0.0040
430	0.0116
440	0.023
450	0.038
460	0.060
470	0.091
480	0.139
490	0.208
500	0.323
510	0.503
520	0.710
530	0.862
540	0.954
550	0.995
555	1.000
560	0.995
570	0.952
580	0.870
590	0.757
600	0.631
610	0.503
620	0.381
630	0.265
640	0.175
650	0.107
660	0.061
670	0.032
680	0.017

Courbe photopique de l'œil humain



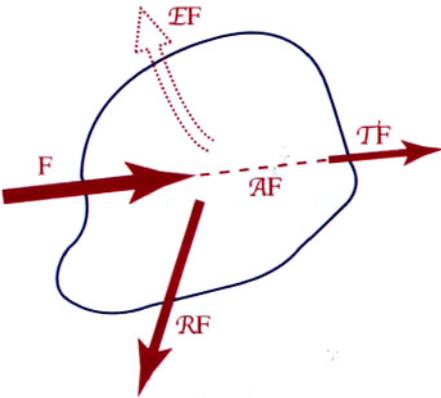
Par exemple l'éclairement E_e en watts par mètre carré (unité énergétique) et l'éclairement E_v en lux (unité lumineuse) sont reliés par la relation :

$$E_v = K_m V(\lambda) E_e$$

$V(\lambda)$ est donc sans dimension et varie entre 0 et 1, alors que K_m , coefficient qui dépend des unités choisies, vaut 683 lumens par watt pour la vision photopique. Ainsi l'éclairement du soleil sur un plan au niveau de la mer qui est de 10^3 W m^{-2} , est égal, au maximum de sensibilité de l'œil, à $6,83 \times 10^5$ lux.

Annexe 7

LE CORPS NOIR



Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement de longueur d'onde λ , de flux F (en watts), une partie $\mathcal{R}F$ est réfléchiée, une partie $\mathcal{A}F$ est absorbée et une partie $\mathcal{T}F$ est transmise comme schématisé sur la figure. Les coefficients \mathcal{R} , \mathcal{A} et \mathcal{T} sont bien sûr sans dimension, compris entre 0 et 1, et tels que :

$$\mathcal{R} + \mathcal{A} + \mathcal{T} = 1$$

pour que l'énergie par seconde se conserve.

Le corps va également émettre par rayonnement un certain flux $\mathcal{E}F$. Si le corps est en équilibre thermique avec le milieu qui l'entoure, on aura forcément égalité entre \mathcal{A} et \mathcal{E} . Si le corps absorbe la totalité du flux F (si $\mathcal{A} = 1$), il ne réfléchit pas le rayonnement qu'il reçoit, il ne le transmet pas non plus. Donc, pour ce rayonnement de longueur d'onde λ , il apparaît comme noir. S'il est en équilibre thermique, le corps réémet la totalité de ce qu'il a absorbé. C'est pour cette raison que ce corps "noir" est parfois appelé radiateur intégral. Le corps noir sert de référence par rapport aux autres corps parce qu'il est possible, à l'aide de la thermodynamique statistique, de connaître la densité d'énergie qu'il émet pour une longueur d'onde fixée λ .

Nous donnerons ici le résultat dû à PLANCK en terme de luminance spectrique, c'est-à-dire la luminance du corps noir dans un tout petit intervalle de longueur d'onde (luminance spectrique $L'(\lambda) = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$). La formule de Planck s'écrit :

$$L'(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)}$$

avec $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ J s constante de Planck,

$k_B = 1,38054 \times 10^{-23}$ JK⁻¹ constante de Boltzmann,

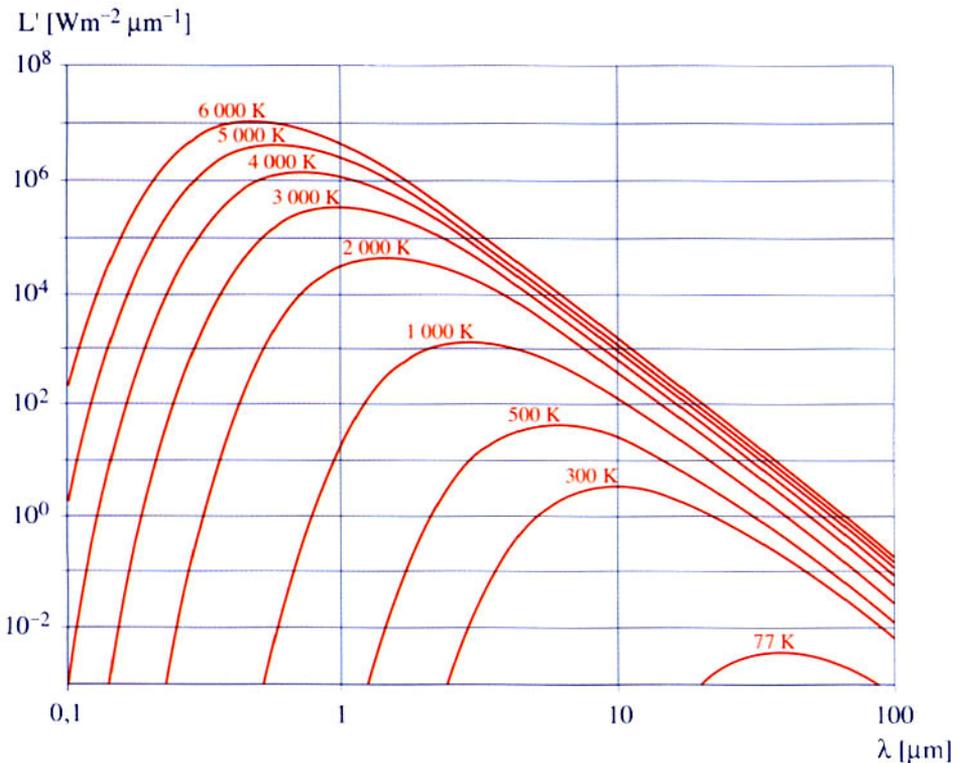
et $c = 2,998 \times 10^8$ m s⁻¹ vitesse de la lumière dans le vide.

Lorsque la longueur d'onde λ est très petite, c'est-à-dire lorsque $\frac{hc}{\lambda}$ est grand devant $k_B T$, on retrouve la formule dite de Wien :

$$L'(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda k_B T}}$$

et lorsqu'au contraire λ est grand ($\frac{hc}{\lambda}$ petit devant $k_B T$), on retrouve la formule dite de Rayleigh :

$$L'(\lambda) = \frac{2c k_B T}{\lambda^4}$$



La propriété remarquable de l'émission du corps noir est illustrée par la figure ci-dessus : la luminance spectrique du corps noir varie en fonction de la longueur d'onde avec la température pour unique paramètre. Ainsi un corps noir à l'équilibre thermique a son maximum d'émission pour une longueur d'onde définie avec les valeurs numériques précédemment rappelées par la relation :

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \mu\text{m}$$

Cette propriété est très importante car l'étude en fonction de la longueur d'onde d'une source proche du corps noir permet de connaître sa température. Comme le soleil se comporte quasiment comme un corps noir, on comprend l'importance de ce résultat.

Il est possible également de considérer la totalité du flux émis par le corps noir en calculant la luminance totale $\int_{-\infty}^{+\infty} L'(\lambda) d\lambda = L_{\text{totale}}$, et d'en déduire l'émittance totale, donc la totalité du flux émis par unité de surface de la source, pour toutes les longueurs d'onde. On trouve la loi de Stefan-Boltzmann :

$$M_{\text{totale}} = \frac{2\pi^5 k_B^4 T^4}{15c^2 h^3} = \sigma T^4$$

avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ T}^{-4}$.

On constate une fois de plus combien l'émission du corps noir dépend fortement de sa température.

Annexe 8

VUE D'ENSEMBLE SUR LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

La dualité onde-corpuscule permet d'utiliser soit le concept d'onde électromagnétique, soit celui de photon. Ainsi une onde de fréquence ν , ou de longueur d'onde λ (avec

$\nu = \frac{c}{\lambda}$), pourra également être considérée comme un flux de particules d'énergie E :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{h est la constante de Planck}).$$

La nature des ondes électromagnétiques a été présentée en annexe 3 : des champs électriques et magnétiques indissociables. Nous proposons ci-après une présentation très rapide de ces ondes, avec quelques commentaires aux diverses longueurs d'onde. La création, la réception, donc les effets et les utilisations des ondes, sont bien appréhendées en considérant la valeur des longueurs d'onde λ et des fréquences ν pour les grandes valeurs de λ . Ce sont les énergies des photons (exprimées ici en électronvolts) qui permettent d'en comprendre la nature pour les faibles valeurs de λ .

Tableau 8.1 - Gamme des ondes radio

Ondes radio	$\Delta\lambda$	$\Delta\nu$
ULF	$> 3 \times 10^7$ m	< 10 Hz
ELF	3×10^7 m à 100 km	10 Hz à 3 kHz
VLF	10 km à 100 km	3 kHz à 30 kHz
LF	1 km à 10 km	30 kHz à 300 kHz
MF	100 m à 1 km	300 kHz à 3 MHz
HF	10 m à 100 m	3 MHz à 30 MHz
VHF	1 m à 10 m	30 MHz à 300 MHz
UHF	10 cm à 1 m	300 MHz à 3 GHz
SHF (micro-ondes)	1 cm à 10 cm	3 GHz à 30 GHz
EHF	1 mm à 1 cm	30 GHz à 300 GHz
submillimétrique	0,3 mm à 1 mm	300 GHz à 1 THz

Ces ondes débutent avec des valeurs de longueur d'onde très grandes devant l'échelle humaine : plusieurs dizaines de milliers de kilomètres pour les ULF ("ultra low frequencies"). On passe ensuite des "extra low frequencies" aux "very low frequencies", puis aux "low frequencies". Ces ondes sont utilisées en téléphonie (par courants porteurs) et pour le sondage des défauts dans les solides. On connaît bien les ondes très basses fréquences (VLF) dans le chauffage à induction et la radionavigation, les ondes basses fréquences (LF) dans la radionavigation également et la radiodiffusion. Nos postes de radiodiffusion nous ont accoutumés aux ondes moyennes (avec modulation d'amplitude) et aux ondes courtes ou hautes fréquences (avec modulation de fréquence). Les ondes très hautes fréquences (VHF, very high frequencies) sont utilisées tant pour la radiodiffusion que pour la télévision. On entre ensuite dans la gamme des micro-ondes dont les appellations indiquent clairement les valeurs typiques des longueurs d'onde : les ondes décimétriques utilisées pour la télévision et les systèmes radar (bande L), les ondes centimétriques pour les radars (bandes S, C, X, K), et les masers qui utilisent aussi les ondes millimétriques. Les ondes décrites ci-dessus sont bien représentées dans leur création et réception par la longueur d'onde : les antennes de télévision qui sont placées sur les toits ont une dimension de 50 centimètres à 1 mètre, ce qui donne bien une idée des longueurs d'onde utilisées.

Tableau 8.2 - Des infrarouges aux rayons γ

Rayonnement		$\Delta\lambda$	Energie (eV)
Infrarouge	Lointain	10^4 nm à 10^6 nm	$1,24 \times 10^{-3}$ à 0,12
Infrarouge		700 nm à 10^4 nm	0,12 à 1,77
Visible		400 nm à 700 nm	1,77 à 3,1
Ultraviolet		30 nm à 400 nm	3,1 à 41,4
	Proche	200 nm à 400 nm	3,1 à 6,2
	Lointain	120 nm à 200 nm	6,2 à 10,3
	Extrême	30 nm à 120 nm	10,3 à 41,4
	XUV ou X mous	10 nm à 30 nm	41,4 à 124,1
X		0,005 nm à 10 nm	124,1 à $2,5 \times 10^5$
γ		< 0,005 nm	> $2,5 \times 10^5$

Avec les infrarouges on entre dans des gammes d'ondes électromagnétiques dont les effets sont compris aussi bien en considérant les valeurs des longueurs d'onde, que celles des énergies (hv) des photons. Par exemple, le rayonnement infrarouge peut induire des vibrations, rotations de molécules et systèmes de molécules plus ou moins importantes. Il est utilisé pour le chauffage, la photographie (infrarouge) et produit par certains lasers.

Le rayonnement visible va entraîner des sauts d'électrons d'une orbitale à une autre, parmi les électrons très éloignés du noyau atomique. On en connaît les multiples usages pour la vision, la photographie, l'action dans la synthèse chlorophyllienne, dans l'analyse chimique. Puis, avec l'augmentation de l'énergie des photons, les effets deviennent notables sur des électrons de plus en plus liés au noyau atomique. Ainsi les rayons ultraviolets peuvent être très actifs dans l'analyse chimique, les réactions et aussi sur notre peau à la plage ! Les photons des rayons X peuvent déclencher des changements d'énergie d'électrons à des niveaux encore plus proches du noyau. Leur longueur d'onde est proche de celles des distances interatomiques, d'où leur usage en diffraction pour connaître l'arrangement des atomes. Ils servent aussi en radioscopie médicale et industrielle, pour le contrôle des matériaux et des surfaces.

Au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue, les objets concernés sont de plus petite taille et l'énergie des photons augmente, donc l'effet sur la matière devient de plus en plus intime. On passe ainsi d'effets sur les électrons à d'autres sur les noyaux atomiques, en créant des isotopes et en séparant des particules constitutives des noyaux (avec les rayons γ). Les applications mettent bien sûr en jeu les ions et les isotopes.

Cette vue d'ensemble sur les ondes électromagnétiques n'est qu'un survol rapide sur 10^{23} ordres de grandeur (de longueur d'onde ou de fréquence). Le lecteur ne doit pas croire que, par ce balayage régulier, l'on soit capable de défiler de façon continue les ondes en faisant varier leur fréquence. On peut observer un phénomène de création ou de réception des ondes électromagnétiques que s'il existe, à la fréquence qui nous intéresse, un processus physique d'interaction entre l'onde et la matière. Par exemple, une onde de quelques centaines d'Angström (10^{-10} mètre) aux environs de 412 kiloélectronvolts n'agit pratiquement pas sur la matière car elle se situe entre l'effet photo-électrique et le processus électron-positon. Pourtant ces photons créés par des plaques d'or irradiées ont une énergie très supérieure à celle des photons X qui vont être vite absorbés, y compris par notre corps. Il ne faut donc pas confondre énergie de photon et faculté d'engendrer un effet.

Annexe 9

CHAMP MAGNÉTIQUE ET MOUVEMENT DES PARTICULES, PLASMA ET CHAMP GELÉS

Le Soleil émet des ondes électromagnétiques et des particules qui constituent le vent solaire. Les phénomènes se produisent en outre dans le champ magnétique solaire (voir annexe 4). Le foisonnement magnétique à la surface du Soleil est dû aux mouvements de la matière ionisée et, par ailleurs, la trajectoire des particules chargées est modifiée dans un champ magnétique. Tout cela est très compliqué ; rappelons d'abord ce qui advient dans le cas simple d'une particule chargée, en déplacement dans un champ magnétique.

Particule en mouvement dans un champ magnétique constant

Soit une particule de masse m et de charge q animée d'une vitesse \vec{v} dans un champ magnétique uniforme \vec{B} . Il s'exerce sur elle une force de Lorentz qui s'écrit :

$$\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

Le repère est tel que l'axe z est porté par le champ magnétique. En écrivant le principe fondamental de la dynamique projeté suivant les trois axes de coordonnées :

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = qB v_y \\ m \frac{dv_y}{dt} = -qB v_x \\ m \frac{dv_z}{dt} = 0 \end{cases}$$

v_z n'est pas affectée par le champ magnétique et reste égale à la composante suivant z de la vitesse initiale de la particule. Des deux premières équations, nous déduisons :

$$\begin{cases} v_y = \frac{m}{qB} \frac{dv_x}{dt} \\ v_x = -\frac{m}{qB} \frac{dv_y}{dt} \end{cases}$$

En substituant v_x et v_y par leurs valeurs dans les dérivées, il vient :

$$\begin{cases} \frac{d^2 v_x}{dt^2} = \left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_x \\ \frac{d^2 v_y}{dt^2} = \left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_y \end{cases}$$

Ainsi, une particule de charge q , avec une vitesse initiale v_x non nulle, va subir une accélération le long de l'axe x . Dès lors se crée une force F_y qui tend à la ramener sur $-y$ (si la charge est positive) ou y (charge négative). Le résultat est alors une giration autour de l'axe z , qui porte le champ magnétique à la vitesse angulaire algébrique ω_c , appelée **pulsation cyclotron** :

$$\omega_c = \frac{qB}{m}$$

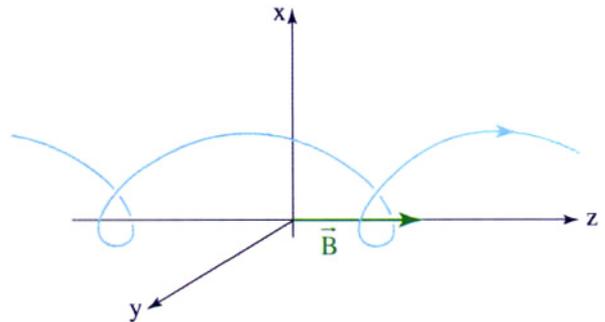
Le sens de giration (donc le signe de ω_c) dépend du signe de la particule mais toutes les particules décrivent des hélices à pas constant, ayant pour axe la direction du champ magnétique (le pas est déterminé par la valeur de la vitesse v_z le long de cet axe). Le mouvement dans le plan perpendiculaire à cet axe est un mouvement circulaire qui se fait à vitesse uniforme (la force magnétique n'apporte pas d'énergie à la particule). Si nous caractérisons la direction parallèle au champ par “//”, et une direction quelconque dans le plan perpendiculaire par “ \perp ” (représentation courante en aéronomie car la direction parallèle à \vec{B} est une direction privilégiée), alors la vitesse des particules dans le plan perpendiculaire a pour module :

$$v_{\perp} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

et le rayon de la trajectoire circulaire décrite dans un plan perpendiculaire s'écrit :

$$r_L = \frac{v_{\perp}}{|\omega_c|} = \frac{mv_{\perp}}{|q|B} \quad \text{appelé rayon de Larmor}$$

La trajectoire représentée correspond à une particule de charge positive qui possédait, à l'instant initial, une vitesse de composantes non nulles v_x positive et v_z positive. Cette dernière se conserve dans le mouvement.



Les relations précédentes décrivent le mouvement d'une particule chargée autour d'un centre guide, qui se déplace à la vitesse v_z le long de l'axe z (direction de \vec{B}). Mais on

sait qu'une particule chargée crée un champ magnétique. Dans le cas présent, la particule en mouvement (les particules) dans un plan perpendiculaire à \vec{B} peut être assimilée à une spire de courant dont l'axe serait \vec{B} . On vérifie aisément que le champ magnétique créé par cette spire est inverse au champ magnétique \vec{B} d'origine. C'est un résultat général ; la giration est toujours décrite dans un sens qui contribue à décroître le champ magnétique d'origine.

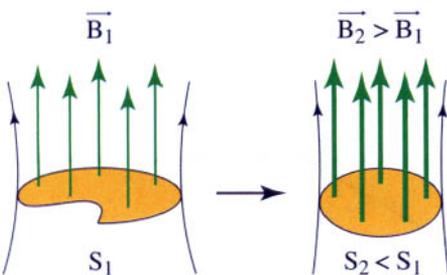
Plasma et champ gelés

L'exemple précédent est bien simple par rapport aux phénomènes à modéliser : les mouvements convectifs de plasma créent sur le Soleil des champs magnétiques avec un pôle nord local et un pôle sud local. Des lignes de champ partent de ces pôles, et les particules chargées du plasma s'enroulent autour de ces lignes. Mais le Soleil éjecte aussi du plasma vers l'extérieur à des vitesses de 700 000 à 2,5 millions de kilomètres à l'heure, et ces particules suivent les lignes de champ en s'enroulant.

Dans un tube de champ magnétique, les grandeurs en interaction sont le champ électrique \vec{E} , le champ magnétique \vec{B} , la densité de courant \vec{j} , la vitesse des particules \vec{v} , la masse volumique ρ , la pression p car ce plasma est aussi un fluide. Il faut donc dans le cas général résoudre un problème à quatorze variables (trois par grandeur vectorielle). On dispose des quatre équations de Maxwell, de la conservation de l'énergie, et de l'équation d'état du plasma. On comprend que, comme dans l'exemple précédent, les champs changent les trajectoires des particules qui "suivent" le champ, et que celles-ci créent également des champs. Il est, dans le cas du Soleil, impossible de distinguer qui du champ magnétique (interplanétaire) ou du plasma en mouvement (vent solaire) génère l'autre. On dit que le champ et le plasma sont "gelés". Nous illustrerons ce phénomène par un exemple particulier, en supposant que la loi d'Ohm puisse être écrite de façon simple :

$$\vec{j} = \sigma [\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}]$$

où σ est la conductivité, très grande, d'un plasma pratiquement sans collisions entre particules. Plus σ est grand, plus le terme dans la parenthèse devient proche de 0.



On peut calculer dans un tel contexte le flux de \vec{B} à travers une surface S_1 d'un tube de champ, et constater que plasma et flux gelés signifie qu'un resserrement du tube de champ (section de S_1 à S_2) va entraîner une croissance de \vec{B} (de \vec{B}_1 à \vec{B}_2) qui correspond à la conservation du flux. C'est ce qui se passe souvent dans les tubes de champ qui sont gelés au vent solaire.

Pour approfondir, on pourra consulter les ouvrages suivants : *Physique des plasmas* (2 tomes), J.L. DELCROIX et A. BERS, CNRS Editions, coll. Savoirs actuels ; et pour réaliser des simulations, un ouvrage intéressant en anglais : *Plasma Physics via Computer Simulation*, C.K. BIRDSALL and A.B. LANGDON, I.O.P. Publishing, 1995.

Annexe 10

PRESSION CINÉTIQUE ET PRESSION MAGNÉTIQUE

Si le vent solaire avec ses particules est assimilé à un gaz parfait, la *pression cinétique* exercée sur une surface unité pourra s'écrire :

$$p_c = \frac{N}{V} k_B T = n k_B T$$

où n est le nombre de particules par unité de volume, k_B la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) et T la température absolue. Nous avons déjà montré en annexe 1 que l'on peut relier l'énergie des particules à l'énergie cinétique pour chaque degré de liberté :

$$\frac{1}{2} k_B T = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$$

où m est la masse des particules et v leur vitesse. Dans le vent solaire, les contraintes magnétiques illustrées en annexe 9 limitent à deux les degrés de liberté. En outre, comme toutes les particules vont à la même vitesse dans le vent solaire, on peut négliger les électrons 1836 fois plus légers que les protons, et ne conserver que ces derniers ($m = 1,675 \times 10^{-27}$ kilogrammes). La pression cinétique du vent solaire devient donc :

$$p_c = \frac{1}{2} n m \overline{v^2} = n k_B T$$

La *pression magnétique* peut être calculée de diverses façons, soit en considérant les forces exercées sur les particules tournant en hélice autour du champ (comme des spires de courant), soit en calculant la densité d'énergie par unité de volume. On trouve ainsi une pression p_m due à ces forces magnétiques :

$$p_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

(μ_0 perméabilité du vide $1,2566 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$)

On pourra approfondir l'origine de la pression magnétique en consultant les ouvrages suivants : *Magnétisme I – Fondements*, sous la direction d'Etienne DU TRÉMOLET DE LACHEISSERIE dans la même collection, ou *Electromagnétisme* par J.Ph. PÉREZ, R. CARLES et R. FLECKINGER, Masson.

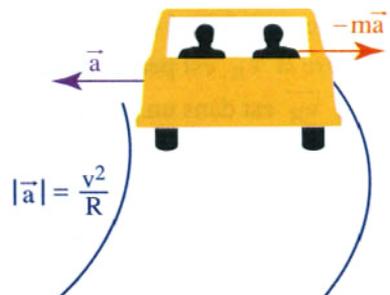
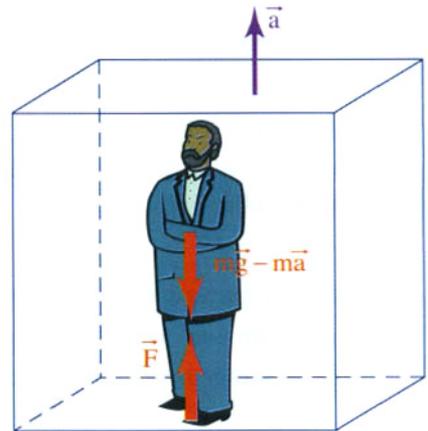
Annexe 11

LA FORCE DE CORIOLIS

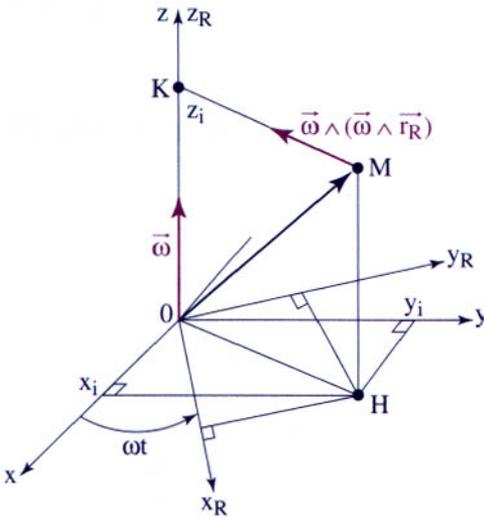
La *force de Coriolis* est une force ressentie par un observateur (ou un objet) en déplacement dans un système en rotation. C'est ce que l'on appelle parfois une force d'inertie, et nous en avons l'expérience dans de nombreuses situations. Par exemple dans un ascenseur qui démarre pour vous emmener du rez-de-chaussée dans les étages, vous vous sentez un peu cloué au plancher alors que vous restez immobile dans l'ascenseur. Celui-ci subit en fait une accélération \vec{a} vers le haut, dans le repère fixe de l'immeuble dans lequel il se translate. Vous êtes immobile dans l'ascenseur parce que la force \vec{F} vers le haut, que vous communiquez le plancher, équilibre votre poids ($m\vec{g}$ si votre masse est m et \vec{g} l'accélération de la pesanteur) et $-m\vec{a}$ force d'inertie qui vous donne cette impression d'augmentation de votre poids.

De façon comparable, lorsque vous êtes assis dans une voiture à côté du chauffeur et que celui-ci conduit sèchement dans un virage à gauche, vous êtes plaqué contre la porte de droite. Auparavant, lorsque le véhicule roulait à vitesse constante en ligne droite, vous étiez bien tranquillement assis sur votre siège, toutes les actions s'équilibrent. Dans ce virage pris à vitesse constante v , la voiture reste sur sa trajectoire circulaire de par l'existence d'une accélération centripète (dirigée vers le centre de courbure de la trajectoire circulaire de rayon R) de module $\frac{v^2}{R}$. Vous subissez alors une force d'inertie en sens inverse de module $\frac{mv^2}{R}$.

Nous venons d'illustrer cette notion de force d'inertie dans un repère en translation par rapport à un repère fixe d'une part, et dans un repère en rotation dans lequel



l'objet (vous) est immobile. Que se passe-t-il pour un objet qui se déplace à la vitesse \vec{v}_R par rapport au repère en rotation ?



Pour représenter cette situation, on choisit un repère $Ox_Ry_Rz_R$, cartésien, en rotation par rapport à un repère fixe $Oxyz$, les axes Oz_R et Oz étant les mêmes. On considère que la rotation autour de l'axe Oz s'effectue avec une vitesse angulaire constante ω . On peut définir la position d'un point M par le vecteur \vec{OM} , et écrire ses composantes dans le repère fixe par rapport aux composantes (coordonnées) dans le repère mobile.

On écrit ainsi :

$$\begin{aligned} x_i &= x_R \cos \omega t - y_R \sin \omega t \\ y_i &= x_R \sin \omega t + y_R \cos \omega t \\ z_i &= z_R \end{aligned}$$

On obtient la vitesse puis l'accélération en dérivant chaque membre, ce qui est facile avec des fonctions trigonométriques. Les équations obtenues permettent d'écrire l'accélération \vec{a} de M dans le repère fixe en fonction de l'accélération \vec{a}_R de M dans le repère tournant :

$$\vec{a} = \vec{a}_R + \vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{r}_R) + 2\vec{\omega} \wedge \vec{v}_R$$

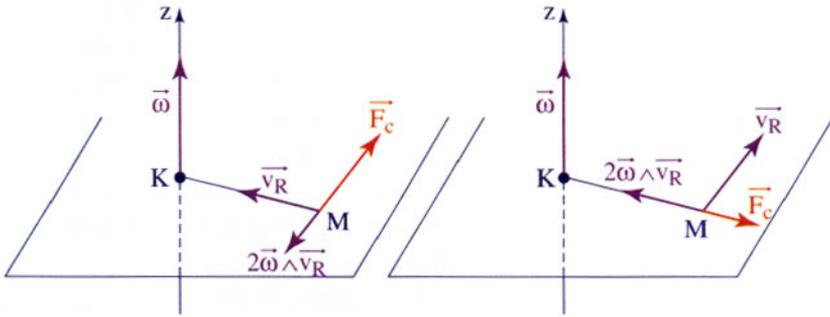
$\vec{\omega}$ est le vecteur vitesse angulaire, porté par l'axe de rotation ; \vec{r}_R et \vec{v}_R sont les position et vitesse de M dans le repère en rotation. Deux termes s'ajoutent à \vec{a}_R dans le second membre :

$$\vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{r}_R)$$

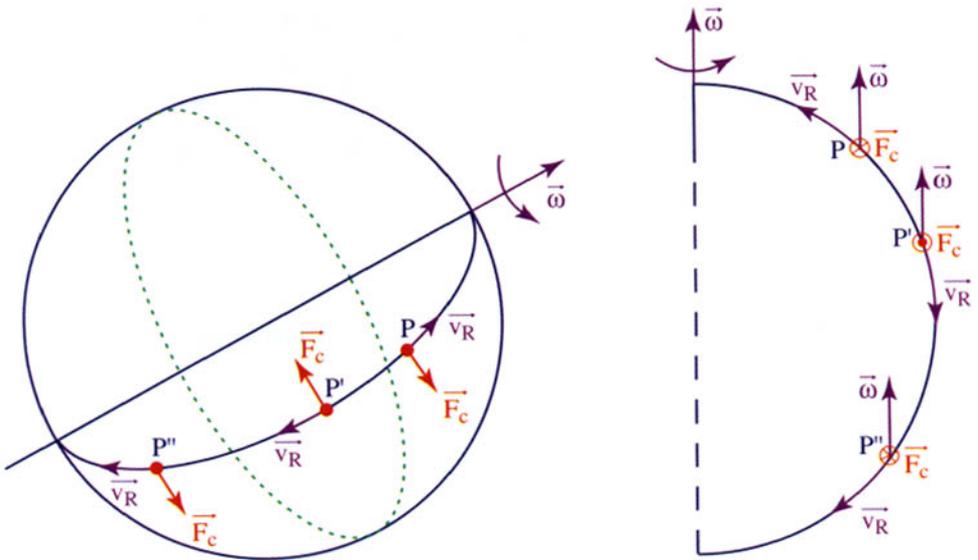
ce vecteur est représenté sur la figure. On constate aisément qu'il est dirigé suivant \vec{MK} et de module $\omega^2 MK$. C'est l'accélération centripète dans l'exemple de la voiture qui décrit un virage (avec $MK = R$ et $v = \omega R$) :

$$2\vec{\omega} \wedge \vec{v}_R$$

Cette contribution n'existe que si M se déplace par rapport au repère en rotation. Elle est nulle toutefois si ce déplacement est parallèle à l'axe de rotation, et maximale au contraire si \vec{v}_R est perpendiculaire à cet axe. Dans les deux exemples représentés ci-après, \vec{v}_R est dans un plan perpendiculaire à $\vec{\omega}$ (donc à Oz), dans un cas dirigé vers l'axe, dans l'autre cas perpendiculaire à MK . Dans les deux cas, l'accélération $2\vec{\omega} \wedge \vec{v}_R$ est indiquée. Si une masse m est placée au point M , elle subira une force d'inertie $-m(2\vec{\omega} \wedge \vec{v}_R)$ qui fera dévier la trajectoire de l'objet M vers la droite (dans notre position d'observation). Cette force d'inertie est la **force de Coriolis** \vec{F}_c .

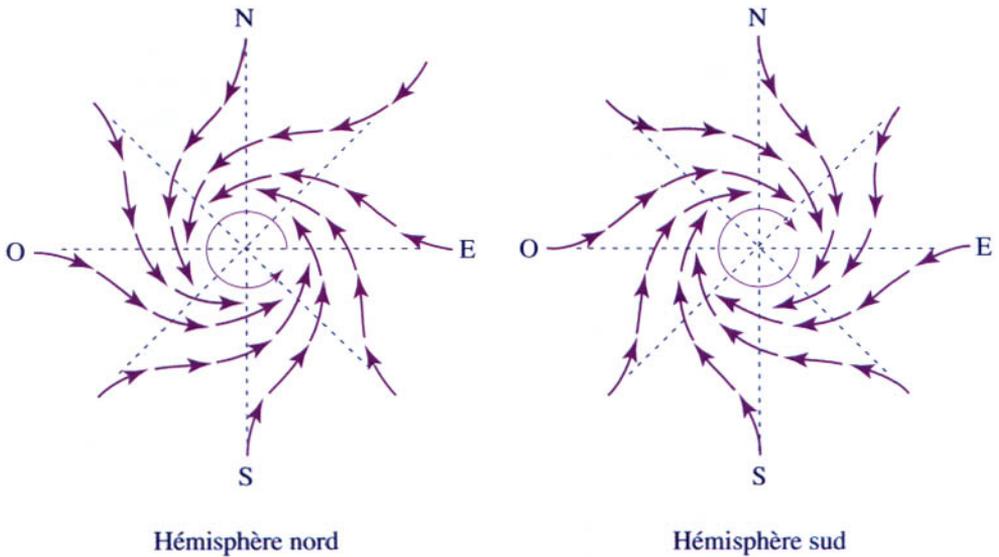


Considérons un objet qui se déplace, suivant un méridien, dans le repère terrestre en rotation dont il subit l'influence. Nous avons représenté cet objet sur le globe ci-dessous. En un point P de l'hémisphère nord, une particule de vitesse relative \underline{v}_R , dirigée vers le nord, subit une force de Coriolis perpendiculaire à la fois à $\underline{\omega}$ et à \underline{v}_R , orientée vers l'est, qui dévie sa trajectoire. Au point P', une particule avec une vitesse relative vers le sud est déviée vers l'ouest. Dans l'hémisphère sud (point P''), le produit vectoriel indique qu'une particule avec une vitesse relative \underline{v}_R , dirigée vers le sud, est déviée vers l'est (figure en perspective à gauche et coupe méridienne à droite).



La force de Coriolis est bien présente : c'est elle qui explique le sens de rotation de l'eau dans le lavabo qui se vide, l'érosion d'une rive de cours d'eau plus que l'autre (c'est la rive droite qui s'érode plus dans l'hémisphère nord), l'usure dissymétrique des rails de chemin de fer (le droit plus usé dans l'hémisphère nord, le gauche dans l'hémisphère sud), et bien sûr les déplacements de trajectoire des missiles ou des obus. Dans tous les cas, le repère R en rotation est la Terre, qui tourne sur elle-même par rapport à un observateur fixe dans le système solaire.

L'exemple le plus adapté au thème de cet ouvrage est donné tous les soirs à la télévision lorsqu'est présentée la météorologie de notre basse atmosphère (pas celle de l'espace, cela sera pour bientôt). Les courants aériens sont des déplacements d'air des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Le vent souffle radialement vers le centre des basses pressions. La force de Coriolis dévie les molécules d'air vers la droite de leur trajectoire dans l'hémisphère nord (vers la gauche dans l'hémisphère sud). Il en résulte un mouvement de tourbillon dans le sens direct (rétrograde dans le sud). Evidemment la pression, la température et leurs diverses distributions compliquent les phénomènes, mais les schémas ci-dessous illustrent bien ce que l'on observe comme enroulements de nuages. En fait, les forces de Coriolis appliquées sur les molécules d'air sont faibles mais elles agissent en permanence sur les objets en déplacement, et leur effet peut être ainsi considérable.



Annexe 12

LES LOIS DE KEPLER

Les mouvements des corps célestes sont la conséquence des lois fondamentales de la dynamique et de la loi de la gravitation. C'est KEPLER, utilisant les observations de Tycho BRAHÉ et les siennes, qui les découvrit. On peut les énoncer comme suit :

1. Les planètes décrivent un mouvement elliptique dont le Soleil occupe un des foyers. C'est la **loi des orbites**.
2. Le rayon joignant le Soleil et une planète balaie des aires égales en des temps égaux. C'est la **loi des aires**.
3. Le carré de la période de révolution d'une planète autour du Soleil est proportionnel au cube du grand axe de l'orbite. C'est la **loi des périodes**.

1. La première loi de Kepler est obtenue en calculant les trajectoires d'un point matériel soumis à l'action d'une force centrale, c'est-à-dire d'une force dirigée vers un même point pris pour centre. Le calcul montre que les trajectoires sont situées dans un plan et sont des ellipses, des paraboles ou des hyperboles.

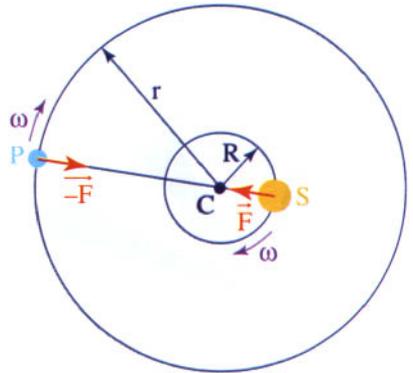
La démonstration n'est pas difficile dans le cas particulier où l'orbite de la planète est un cercle. La planète P de masse m décrit un cercle de rayon r autour du centre de masse C, alors que le Soleil de masse M (grande devant m) décrit un cercle de rayon R. Par définition du centre de masse,

$$MR = mr$$

P et S sont soumises aux forces gravitationnelles équilibrées par les forces centripètes (loi fondamentale de la dynamique pour la translation) :

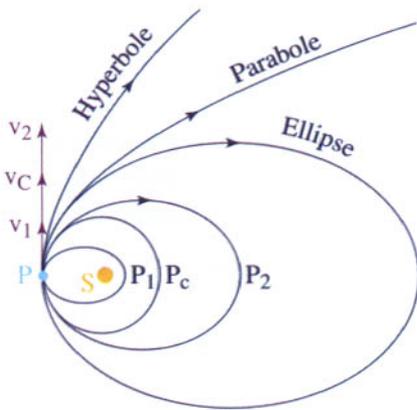
$$\frac{GMm}{(r+R)^2} = m \omega_P^2 r = M \omega_S^2 R$$

On voit que les vitesses angulaires sont les mêmes (ω) de par la relation qui définit le centre de masse.



Si la masse du Soleil est très grande devant celle de la planète, ce qui est le cas, r sera très grand devant R , et donc $r + R \approx r$. Dans le cas où la trajectoire est un cercle (situation P_c), la vitesse de la planète, perpendiculaire au rayon vecteur, pourra s'écrire :

$$v_c = r\omega \approx \left[\frac{GM}{r} \right]^{\frac{1}{2}}$$



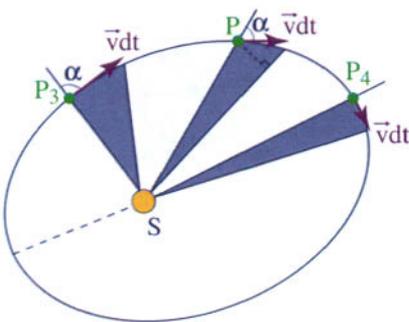
Des calculs plus compliqués montrent que la nature de l'orbite dépend de la vitesse initiale de la planète. Si celle-ci est inférieure à v_c , la trajectoire est une ellipse dont le Soleil occupe le foyer le plus éloigné (situation P_1). Si cette vitesse devient supérieure à v_c , la trajectoire devient une ellipse dont le Soleil occupe le foyer le moins éloigné (situation P_2). Si la vitesse atteint la valeur :

$$v_p = \left[\frac{2GM}{r} \right]^{\frac{1}{2}}$$

la trajectoire devient une parabole. Si la vitesse initiale augmente encore, la trajectoire devient une hyperbole et le corps céleste n'est plus une planète puisqu'il ne reviendra jamais au même point.

2. La deuxième loi de Kepler est obtenue en appliquant le théorème du moment cinétique (loi fondamentale de la dynamique pour la rotation). Comme les forces gravitationnelles sont centrales, leurs moments par rapport au Soleil sont nuls en permanence. Le moment cinétique est donc constant :

$$\overline{SP} \wedge m\vec{v} = \text{constante} = m r v \sin \alpha$$



Sur le schéma ci-contre, la surface balayée par un rayon vecteur SP pendant le temps dt est colorée. Cette surface dS tend vers $r v dt \sin \alpha$ lorsque dt tend vers zéro. Il est donc possible de conclure que $\frac{dS}{dt}$, surface balayée par SP par unité de temps, est une constante. Il s'en suit qu'au cours d'une révolution sur l'orbite, la planète a une vitesse maximale lorsqu'elle est rapprochée du Soleil (situation P_3), et une vitesse minimale lorsqu'elle en est éloignée (situation P_4).

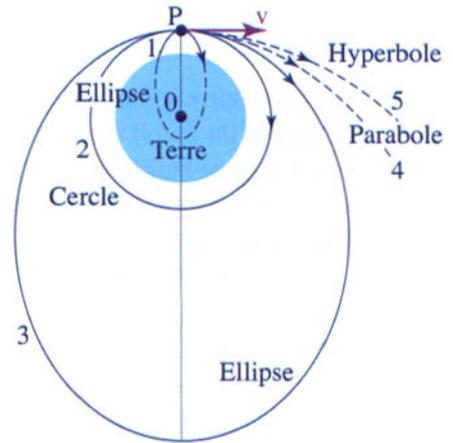
3. La troisième loi de Kepler se démontre facilement dans le cas simple du cercle avec $r \gg R$. La vitesse sur orbite est égale au périmètre de l'orbite divisé par la période de révolution T :

$$v_c = \frac{2\pi r}{T} = \left[\frac{GM}{r} \right]^{\frac{1}{2}}$$

donc
$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Comme $\frac{4\pi^2}{GM}$ est une constante dans le système solaire, on voit que T^2 est proportionnel à r^3 pour toutes les planètes. On peut démontrer cette loi avec des calculs un peu plus longs pour les ellipses.

Les lois de Kepler sont bien vérifiées dans les mouvements des corps célestes. Elles régissent également les mouvements des corps attirés par la terre, donc des satellites ou des fusées. La figure ci-contre illustre les diverses situations possibles. Dans le cas 1, la vitesse n'est pas suffisante et le corps revient sur terre en décrivant une portion d'ellipse. Le cas 2 est celui d'un satellite sur une orbite circulaire, la vitesse est de 7,93 kilomètres par seconde. Le cas 3 est celui d'une orbite elliptique. Le corps se libère de l'attraction terrestre lorsque la vitesse atteint la vitesse de 11,2 kilomètres par seconde (trajectoire parabolique indiquée 4). Pour des vitesses plus grandes (5) les trajectoires sont des hyperboles.

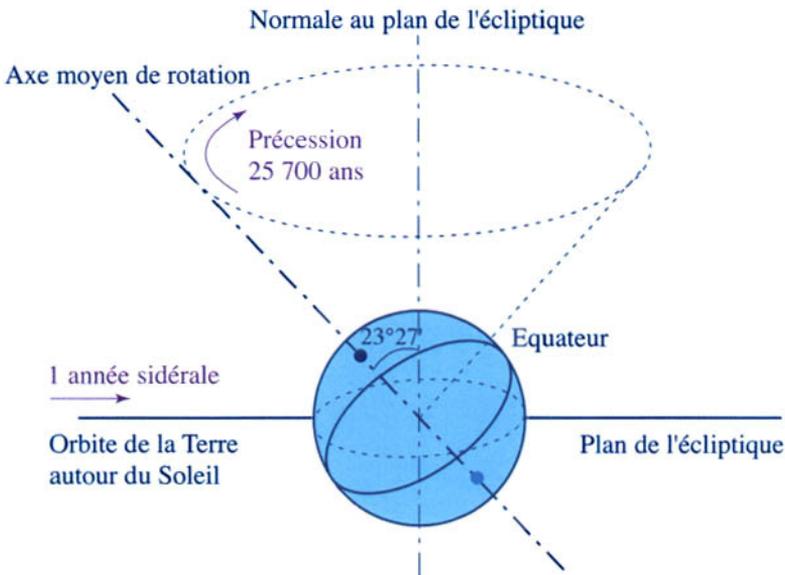


Annexe 13

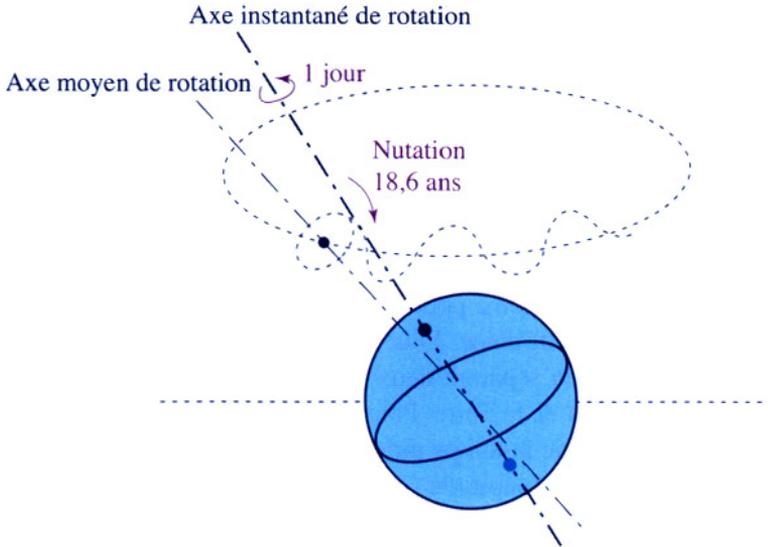
TEMPS SIDÉRAL ET TEMPS SOLAIRE

Les oscillations de la Terre dans sa rotation

La Terre tourne sur elle-même d'ouest en est autour de l'axe des pôles, et tourne également autour du Soleil d'ouest en est dans un plan appelé le plan de l'écliptique. Son axe nord-sud est incliné de $23^{\circ}27'$ sur ce plan. Cet angle entre l'axe nord-sud et la normale au plan de l'écliptique reste le même au cours du temps. Cependant, l'axe nord-sud décrit un cône en 25 700 ans, comme le fait l'axe de rotation d'une toupie. Ce cône est décrit d'est en ouest, à l'inverse des rotations précédentes. Cette rétrogradation s'appelle la précession des équinoxes. Elle trouve son origine dans le fait que la Terre n'est pas parfaitement sphérique et homogène, mais possède un bourrelet équatorial. L'action exercée sur elle par le Soleil, la Lune et même par les autres planètes du système solaire tend à ramener ce bourrelet dans le plan de l'écliptique, et génère la précession.



La Terre tourne autour du Soleil en une année sidérale, en définissant le plan de l'écliptique. L'axe de rotation moyen de la Terre fait un angle de $23^{\circ}27'$ avec la normale à l'écliptique, et décrit un cône en 25 700 ans.



L'axe instantané de rotation de la Terre oscille autour de l'axe moyen en décrivant un cône de $18''4$ d'angle au sommet en 18,6 ans. Bien sûr, la Terre tourne autour de son axe instantané de rotation en un jour.

Une seconde perturbation se superpose à la précession des équinoxes : la nutation. De moindre envergure mais de période beaucoup plus courte, 18,6 ans, la nutation est due aux variations du plan orbital de la Lune. Elle ajoute une légère oscillation à la précession des équinoxes comme illustré sur la figure ci-dessus. Au terme principal de nutation s'ajoutent enfin de nombreux termes d'amplitudes très faibles, d'origine luni-solaire.

La durée d'une année

En raison de la précession, l'année n'est pas identique pour un observateur extérieur au système Soleil-Terre et pour un observateur à la surface de notre planète. Pour le premier, le temps mis par le centre de la Terre pour se retrouver au même point après une rotation autour du Soleil constitue l'année sidérale. Ce temps vaut 365,263 36042 jours de 24 heures¹ (365 jours 6 heures 9 minutes 9 secondes). L'observateur à la surface de la Terre définit son année, appelée l'année tropique, comme le temps nécessaire pour se retrouver à la même position par rapport au Soleil. Comme, entretemps, l'axe de rotation a précessé en sens inverse du sens de rotation de la Terre autour du Soleil, cette année-là est légèrement plus courte que l'année sidérale : 365,242 19879 jours de 24 heures (365 jours 5 heures et 48 minutes). L'établissement du calendrier a conduit à définir l'année julienne qui fixe la durée de l'année à 365 jours, avec un jour

¹ 1 heure = 3 600 secondes, la seconde étant définie indépendamment de la rotation terrestre comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 132.

supplémentaire tous les quatre ans (les années bissextiles). L'avance d'environ 21 minutes de l'année tropique sur l'année sidérale est à l'origine de l'introduction du calendrier grégorien, qui apporte une correction au calendrier julien : les années normalement bissextiles qui ne sont pas divisibles par 400 sont conservées normales ; ainsi l'an 2000 était bissextile alors que l'an 1900 ne l'était pas. L'erreur résiduelle est alors de un jour en 3 000 ans.

La durée du jour

La durée du jour n'est pas la même pour tous les observateurs. L'effet de précession seul n'explique pas cette différence. Pour l'observateur éloigné, le jour sidéral est l'intervalle de temps moyen séparant deux passages consécutifs d'une étoile quelconque au zénith d'un point de la Terre. Pour l'observateur à la surface de la Terre, le jour solaire est défini comme le temps moyen séparant deux passages successifs du Soleil au-dessus de la même longitude (du méridien d'un même lieu). Or, le temps qu'elle fasse un tour sur elle-même, la Terre a tourné légèrement autour du Soleil, dans le même sens de rotation. Cela explique que le jour solaire excède de 3 minutes et 56 secondes le jour sidéral : le premier vaut 24 heures, et le second 23 heures 56 minutes et 4,0905 secondes.

Ces valeurs vont fluctuer pour diverses raisons. Citons l'effet de frottement des marées (influence de la Lune et du Soleil) qui entraîne un ralentissement de la rotation de la Terre sur elle-même et, par voie de conséquence, une augmentation de la durée du jour de 0,00164 seconde par siècle : les derniers dinosaures connaissaient une journée plus courte que la nôtre de plus d'un quart d'heure. Cette valeur donnant le taux de ralentissement par siècle n'est cependant pas constante : elle varie en fonction du déplacement de masses à l'intérieur de la Terre (voir chapitre 2), qui peuvent ralentir aussi bien qu'accélérer la rotation, et également en fonction de l'influence gravitationnelle des autres corps. Ce ralentissement a un effet important sur le couplage entre la Terre et la Lune. En raison de la loi de conservation du moment cinétique, il s'accompagne d'un éloignement de la Lune de quelques centimètres par an.

Nous devons donc prendre garde aux définitions des années, des jours que l'on utilise. Si le lecteur désire approfondir ces notions, il pourra consulter l'ouvrage suivant : *Éléments de mécanique céleste*, G. PASCOLI, Armand Colin.

Annexe 14

CARACTÉRISATION DE L'ACTIVITÉ MAGNÉTIQUE AU MOYEN D'INDICES

Nous avons examiné un grand nombre de phénomènes magnétosphériques, tous liés peu ou prou à l'existence du champ magnétique terrestre. Leur complexité pose d'emblée le problème de leur suivi. Comment procéder à un enregistrement des perturbations magnétiques qui permette rapidement de percevoir leurs caractéristiques majeures ? Ce problème est identique à celui de l'identification de l'activité solaire et nécessite un indicateur : l'indice d'activité magnétique.

Le champ géomagnétique est la résultante du champ intrinsèque de la Terre, avec ses variations propres, et des perturbations dues aux interactions avec le vent solaire et aux courants ionosphériques. Ces interactions sont différentes selon la latitude d'observation : la calotte polaire est conditionnée par les lignes de champ ouvertes, les ovales auroraux par les lignes fermées dans la magnétosphère, les basses latitudes par le courant annulaire. Les zones intermédiaires, elles, sont sensibles à tous les phénomènes à la fois.

L'idée de définir un indice global date de 1939, c'est-à-dire avant l'ère numérique. Aussi le premier d'entre eux, appelé "K" est-il très imprécis. Dans le souci de bâtir une base de données permettant l'étude à long terme des variations du champ, on continue cependant à le calculer. Il décrit l'activité magnétique de 3 heures en 3 heures. Les composantes horizontales du champ magnétique sont mesurées, puis on en retranche les variations qu'on sait être dues à des phénomènes terrestres, globaux ou locaux (c'est ce que l'on appelle le système S_R , pour Solar Regular conditions, dont la moyenne définit un système appelé S_q pour Solar Quiet conditions). Les observatoires sont au nombre de 13, dont deux seulement se trouvent dans l'hémisphère sud. Il n'y en a ni en Afrique, ni en Amérique Latine, ni en Asie, ni en Europe de l'Est. Aucun n'est localisé dans une mer ou un océan. Dans chaque observatoire, le champ magnétique est moyenné sur 3 heures, et calé sur une échelle quasi logarithmique K qui va de 0 (pas d'activité) à 9 (conditions très actives). Cet indice est donc un code. Des lettres auraient tout aussi bien pu être choisies que des chiffres.

Ces indices K sont ensuite moyennés, en appliquant une pondération qui tente de tenir compte à la fois de la mauvaise répartition des stations de mesures, et du fait que les excursions magnétiques sont plus importantes à haute qu'à basse latitude. Cette

moyenne donne un indice planétaire K_p . Pour le raffiner un peu, on lui autorise 28 valeurs, comprises entre 0 et 9, avec trois possibilités pour un nombre intermédiaire (par exemple 5-, 5, 5+).

La multiplication des stations de mesures a autorisé l'émergence d'indices calculés de la même façon que K , mais avec une meilleure distribution en latitude et adaptés aux hémisphères nord (indice n) ou sud (indice s). Cependant, comme l'échelle K ne permet aucun calcul arithmétique, on a défini en 1951 un indice linéaire appelé amplitude planétaire équivalente et noté A_p . La moyenne journalière des A_p (sur 8 valeurs représentant 3 heures de données chacune) donne un indice journalier A_p en unité magnétique 2 nT ($= 10^{-9}$ tesla). Puisque la tendance régulière des variations du champ a été retirée, l'indice A_p représente la seule perturbation du champ magnétique.

Les indices K_p et A_p sont remarquablement fiables dans la description des phénomènes ionosphériques globaux. A haute latitude cependant, le comportement magnétique devient très spécifique. L'indice AE a été construit pour les zones aurorales : les stations de mesure se trouvent entre $\pm 60^\circ$ et $\pm 71^\circ$ de latitude géomagnétique. De façon similaire, les régions équatoriales sont sensibles au courant annulaire dont les perturbations ne dépendent ni de l'heure locale ni de la longitude. Un réseau de cinq observatoires répartis autour de l'équateur fournit l'indice Dst pour ces zones.

La modélisation de l'environnement terrestre s'appuie sur ces indices qu'il faut prévoir ou estimer, selon les besoins spécifiques.

Annexe 15

VARIATION DE LA CONCENTRATION MOLÉCULAIRE AVEC L'ALTITUDE

La concentration moléculaire et la pression varient avec l'altitude suivant des relations qui dépendent des conditions thermodynamiques.

Considérons l'atmosphère terrestre comprise entre 10 et 30 kilomètres d'altitude z par rapport au sol de la terre. Cette partie de l'atmosphère peut être considérée comme isotherme avec une température T égale en moyenne à 217 kelvins. On néglige la variation de g , accélération de la pesanteur, avec l'altitude et on considère le gaz comme parfait. Dans ces conditions, seule l'énergie potentielle ω d'une molécule change : $\omega = mgz$, avec m masse d'une molécule. La statistique de Boltzmann permet de connaître le nombre de molécules aux diverses énergies, donc aux diverses altitudes :

$$N(z_1) = N_0 e^{-\left(\frac{\omega_1}{kT}\right)} = N_0 e^{-\left(\frac{mgz_1}{kT}\right)}$$

$$N(z) = N_0 e^{-\left(\frac{mgz}{kT}\right)}$$

d'où
$$N(z) = N(z_1) e^{-\left(\frac{mg(z-z_1)}{kT}\right)}$$

En introduisant la masse molaire M , le nombre d'Avogadro \mathcal{N} ($m = \frac{M}{\mathcal{N}}$) et la constante des gaz parfaits R ($k = \frac{R}{\mathcal{N}}$), on peut écrire la concentration moléculaire $n(z)$ à l'altitude z :

$$n(z) = \frac{N(z)}{\text{Volume}} = n(z_1) e^{-\left(\frac{z-z_1}{H}\right)} \quad (1)$$

où $H = \frac{RT}{Mg}$, appelée la hauteur d'échelle, dépend du gaz.

Le gaz étant considéré comme parfait, on peut obtenir la pression $p(z)$:

$$n(z) = \frac{\left(p(z) \frac{V}{RT}\right)}{V} \mathcal{N} = \frac{p(z)}{kT}$$

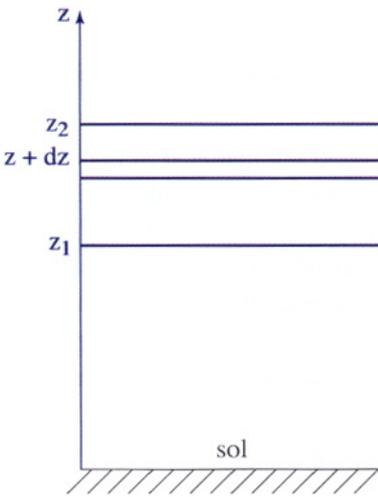
et

$$p(z) = p(z_1) e^{-\left(\frac{z-z_1}{H}\right)} \quad (2)$$

Cette relation reste valable si l'on considère un mélange de gazs avec une pression partielle $p_a(z)$ pour chaque gaz :

$$p_a(z) = p_a(z_1) e^{-\left(\frac{z-z_1}{H_a}\right)}$$

avec H_a hauteur d'échelle égale à $\frac{RT}{M_a g}$, où M_a est la masse molaire du composant gazeux considéré.



On pouvait également obtenir la loi de variation de la pression en écrivant la différence de pression entre deux points séparés de dz :

$$dp = -\rho g dz$$

(où ρ est la masse volumique égale à $\frac{M}{V}$)

$$\frac{dp}{p} = -\frac{M}{RT} g dz \quad (3)$$

ou en intégrant entre z_1 et z :

$$p(z) = p(z_1) e^{-\left(\frac{z-z_1}{H}\right)}$$

La relation (3) permet de trouver la relation (2) de variation de la pression avec l'altitude dans la stratosphère. Elle peut permettre des calculs comparables dans des conditions non isothermes. Citons pour l'exemple les basses altitudes ($0 < z < 2$ kilomètres), où la température obéit à une loi hyperbolique :

$$T(z) = \frac{T_0}{1 + az}$$

En remplaçant $T(z)$ dans la relation (3) et en intégrant, on obtient pour $p(z)$:

$$p(z) = p(0) e^{-\left(\frac{Mg}{RT_0} z \left(1 + \frac{a}{2} z\right)\right)}$$

On cite aussi dans le texte le cas d'une décroissance linéaire de la température avec l'altitude. C'est ce qui se produit entre 2 kilomètres et 9 kilomètres. Si T_1 et z_1 sont les température et altitude à 2 kilomètres, on peut écrire :

$$T(z) = T_1 (1 - bz)$$

En remplaçant à nouveau $T(z)$ dans (3) et en intégrant, on obtient :

$$p(z) = p(z_1) \left(\frac{1 - bz}{1 - bz_1}\right)^{\frac{Mg}{bRT_1}}$$

qui correspond à une variation continue de p avec l'altitude z .

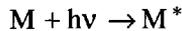
ELÉMENTS DE CHIMIE ATMOSPHERIQUE

Dans l'atmosphère, les particules peuvent interagir avec les photons solaires ou interagir entre elles. Dans le premier cas, on parle de photochimie, alors que le second relève de la chimie classique.

La photochimie

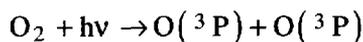
Un constituant M de l'atmosphère peut absorber un photon selon trois processus : l'excitation, la dissociation de molécules, et l'ionisation.

L'**excitation** par absorption d'un photon de fréquence ν s'écrit :

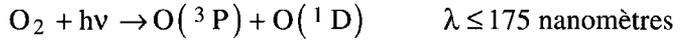


M représente un atome ou une molécule de l'atmosphère et M^* un atome ou une molécule excité, c'est-à-dire dont l'énergie est supérieure à celle de l'atome stable. Dans les équations d'interactions rayonnement-matière, on note traditionnellement un photon par son énergie $h\nu$ où h représente la constante de Planck. L'énergie minimum (ou la longueur d'onde maximum) requise pour qu'une interaction rayonnement-matière ait lieu s'appelle un seuil. Les seuils d'excitation dans la thermosphère terrestre sont suffisamment faibles pour que tout le rayonnement ultraviolet ait un pouvoir d'excitation. Les états d'excitation sont de diverses natures. Une excitation électronique correspond à l'absorption par un électron de l'énergie du photon. L'électron s'éloigne alors du noyau atomique. Une excitation vibrationnelle correspond à la mise en vibration d'une molécule à des fréquences caractéristiques dans la thermosphère de 100 milliards de mouvements par seconde. Une excitation rotationnelle fait tourner une molécule sur elle-même, typiquement 10 milliards de fois par seconde dans la thermosphère.

Un photon peut également **dissocier** une molécule, c'est-à-dire la casser en plusieurs atomes ou molécules. Dans la thermosphère, les seules molécules existantes sont N_2 , O_2 et H_2 , des molécules constituées de deux atomes identiques. Parmi elles, le seuil de photodissociation le plus élevé en longueur d'onde (donc le plus faible en fréquence) se rencontre pour O_2 :



On note entre parenthèses le symbole de l'état d'excitation de l'atome. L'état (3P) de l'oxygène atomique est l'état fondamental, et cette réaction peut avoir lieu pour des longueurs d'onde inférieures au seuil $\lambda = 242,4$ nanomètres. Naturellement, l'un au moins des atomes formés par photodissociation peut se trouver dans un état excité, l'état (1D) de l'oxygène atomique, par exemple :



Cet état se désexcite vers l'état (3P) en émettant une lumière rouge dont nous avons fait mention dans le chapitre 2 (illustré par la figure 2.14).

Un photon peut également arracher un électron à la molécule ou l'atome cible. Là encore, le seuil d'**ionisation** le plus grand en terme de longueur d'onde des éléments thermosphériques est celui de la molécule d'oxygène :



Lorsque le rayonnement ionisant est de longueur d'onde inférieure à 73,2 nanomètres, l'ion oxygène moléculaire peut également se trouver dans un état excité.

Appelons indifféremment p le processus par lequel une particule absorbe un photon. Il peut s'agir d'excitation, de dissociation ou d'ionisation. Le flux de photons qui arrive à une altitude z de l'atmosphère et à la longueur d'onde λ est $I(\lambda, z)$. Ses unités sont $m^{-2} s^{-1} nm^{-1}$: il s'agit d'un flux de photons pour une longueur d'onde définie. La probabilité d'absorption d'un photon par la particule cible M , à travers le processus p , se quantifie en utilisant le concept de "section efficace" σ_M^p dont l'unité est le mètre carré. La section efficace varie en fonction de la longueur d'onde. De façon imagée, une section efficace représente la surface équivalente sur laquelle une interaction peut avoir lieu entre deux particules. A une altitude z donnée de l'atmosphère, la production (en $m^{-3} s^{-1}$) de particules dissociées, excitées ou ionisées par l'un des processus p est proportionnelle à cette section efficace, à la concentration n_M de particules M à cette altitude, et au flux $I(\lambda, z)$ de photons qui arrivent en z aux longueurs d'ondes efficaces pour p :

$$Prod_M^p(z) = \int n_M(z) \sigma_M^p(\lambda) I(\lambda, z) d\lambda$$

Cette formule permet quelques estimations numériques : dans la thermosphère, les sections efficaces sont de l'ordre de $10^{-21} m^2$. Supposons cette valeur constante pour l'ionisation. Le flux solaire intégré sur toutes les longueurs d'onde de l'extrême ultraviolet est de l'ordre de 10^{14} photons par mètre carré et par seconde, arrivant sous incidence normale à 150 kilomètres dans une atmosphère avec 2×10^{16} molécules par mètre cube (composée pour moitié de molécules d'oxygène, et pour moitié de molécules d'azote). L'application numérique conduit à la production de 2×10^9 électrons par mètre cube et par seconde.

A l'état stationnaire, et pour une altitude située entre 80 et 200 kilomètres, une loi simple permet de déduire la concentration électronique $n_e(z)$ à partir d'un coefficient de recombinaison efficace α_{eff} :

$$n_e(z) = \sqrt{\frac{\text{Prod}_M^p(z)}{\alpha_{\text{eff}}}}$$

α_{eff} est de l'ordre de $3 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à 90 kilomètres, $10^{-14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à 110 kilomètres, et $7 \times 10^{-15} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à 200 kilomètres. Avec une valeur de $8 \times 10^{-15} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à 150 kilomètres, on obtient une valeur de la concentration électronique de $5 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$, ce qui constitue un ordre de grandeur correct pour un Soleil moyennement actif.

La chimie atmosphérique

Les électrons, ions, atomes ou molécules excités ou créés par l'absorption d'un photon solaire contribuent à divers processus chimiques avec l'atmosphère ambiante. Une transformation chimique est une réaction qui met deux corps en interaction. Elle peut donc se caractériser par une section efficace. Cependant, il est souvent plus simple pour les calculs de temps de réaction de faire appel à un coefficient chimique, lié à la section efficace¹, qui caractérise la vitesse à laquelle la réaction se déroule. La forme la plus générale d'un coefficient k de réaction chimique est donnée par :

$$k = A T^B \exp\left(\frac{-C}{T}\right)$$

T est la température en kelvins, A , B et C sont des constantes spécifiques de chaque réaction chimique. Le fait que le coefficient k dépende généralement de la température rend plus complexe la modélisation de la thermosphère. Cependant, une simplification intervient dans la mesure où, à un instant donné, les réactions chimiques thermosphériques ne font intervenir que deux corps. Dans certaines circonstances, ces réactions se laissent réduire au coefficient de recombinaison efficace exposé ci-dessus.

Le lecteur qui souhaite connaître le détail des coefficients des réactions chimiques de la thermosphère et de l'ionosphère peut se référer à :

Du Soleil à la Terre – Aéronomie et météorologie de l'espace, J. LILENSTEN et P.L. BLELLY, EDP Sciences, coll. Grenoble Sciences.

1 Soit un ensemble de particules dotées d'une distribution de vitesses $f(v)$. Par définition de la fonction de distribution, la vitesse moyenne des particules est $\int f(v)v dv$. Soit l'exemple d'un ensemble de particules constitué des ions du vent solaire de vitesse moyenne de 370 km s^{-1} et de concentration n_i . On suppose que ces ions entrent en collision avec une population de particules thermosphériques M en concentration n_M , de faible énergie. Cette interaction se caractérise par la section efficace d'interaction σ . On peut également la caractériser par le coefficient de réaction k selon : $k = n_M n_i \int \sigma f(v)v dv$. Comme $f(v)$ est en général une fonction de la température du milieu, le coefficient de réaction lui aussi dépend d'ordinaire de la température.

Annexe 17

MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN TUBE DE CHAMP MAGNÉTIQUE

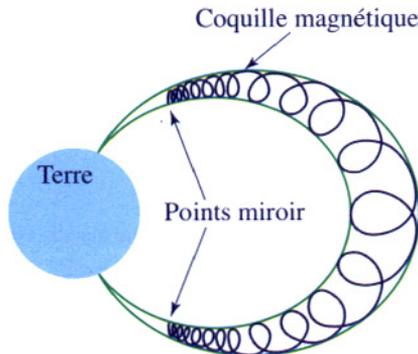
Nous avons décrit en annexe 9 le mouvement d'une particule dans un champ magnétique, et la façon dont champ magnétique et particules pouvaient être liés, "gelés".

Considérons une particule chargée qui spirale dans des lignes de champ magnétique de plus en plus resserrées. C'est ce qui se produit lorsque des particules s'approchent de la surface de la Terre à haute latitude. Ce cas est illustré sur la figure ci-dessous.

Au cours de son mouvement, la particule voit l'amplitude du champ magnétique varier et donc son rayon de giration se modifie le long de sa trajectoire, ainsi que l'illustre la figure. La fréquence de rotation, proportionnelle au champ magnétique, augmente en descendant vers la Terre. On peut montrer qu'au cours du mouvement, se conserve une quantité appelée le premier invariant adiabatique. Son expression est :

$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$$

v_{\perp} désigne la vitesse perpendiculaire au champ magnétique, m la masse, B l'intensité du champ magnétique.



Une particule chargée dans un champ magnétique suit une ligne de champ en spiralant. Lorsque les lignes se resserrent, comme c'est le cas en s'approchant de la surface de la Terre, le diamètre de la spirale se rétrécit, et la particule tourne de plus en plus vite. En revanche, sa vitesse de descente diminue, jusqu'à s'annuler. La particule part alors dans le sens inverse : c'est l'effet de miroir magnétique.

L'énergie de ce mouvement perpendiculaire au champ magnétique de plus en plus rapide est consommée au détriment de l'énergie du mouvement parallèle. En effet, on doit conserver l'énergie cinétique totale, qui est la somme $\frac{1}{2} m \left(v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2 \right)$ où v_{\parallel} désigne la vitesse parallèle au champ magnétique. Si la vitesse perpendiculaire augmente, cette conservation implique que la vitesse parallèle diminue. Eventuellement, la particule ne peut plus avancer, et peut être contrainte à repartir dans l'autre direction. Cette variation est à même de faire "rebondir" une particule, donnant l'impression que le champ agit comme un miroir. La réflexion se fait généralement aux deux extrémités des lignes de champ et a pour effet de piéger les particules dans des tubes de champ qui constituent ainsi des réservoirs de particules énergétiques. Ce phénomène de rebond porte le nom de **miroir magnétique**. La position du point de rebond, ou "point miroir" par rapport à l'atmosphère conditionne une bonne partie de la physique de la magnétosphère et de l'ionosphère. Il dépend entre autre de l'angle avec lequel la particule attaque l'atmosphère (par rapport au champ magnétique) : plus cet angle est petit, plus elle descend bas. L'altitude la plus basse est atteinte pour une particule circulant parallèlement au champ, sans aucune vitesse perpendiculaire. Cet angle d'attaque varie au cours de la vie de la particule à cause des collisions avec les autres particules.

Le mouvement des particules peut devenir plus compliqué si, à la force de Lorentz due au champ magnétique, se superpose une autre force \vec{F} . La particule continue son mouvement en spirale, mais celui du centre guide va dépendre de cette force, comme d'ailleurs le sens dans lequel la spirale est décrite par la particule. Pour étudier le mouvement du centre guide, on peut considérer que sa vitesse est constante donc son accélération nulle, et écrire grâce à l'équation fondamentale de la dynamique :

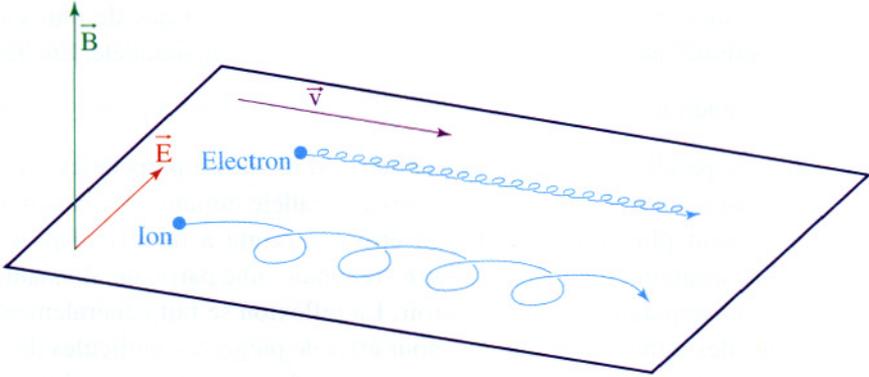
$$\vec{0} = \vec{F} + q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

d'où
$$\vec{F} = -q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

En multipliant vectoriellement à gauche et à droite par \vec{B} , on obtient facilement :

$$\vec{v} = \frac{\vec{F} \wedge \vec{B}}{q B^2}$$

Si la force dérive d'un champ électrique, elle s'écrit $\vec{F} = q\vec{E}$. Dans l'équation stationnaire de la vitesse de la particule, la charge se simplifie : ions et électrons dérivent dans la même direction. Par contre, leur enroulement autour de la direction du champ magnétique se fait dans un sens différent (figure 2). Ce cas se rencontre dans la magnétosphère terrestre : ions et électrons piégés côté nuit sont contraints de se diriger tous vers l'avant de la magnétosphère.



En revanche, dans un champ de gravité, la force s'écrit $\vec{F} = m \vec{g}$. Il s'en suit que la vitesse du centre guide dépend à la fois de la masse et du signe de la particule : il se crée un courant. Ceci est particulièrement important pour des planètes massives, telle que Jupiter.

Un autre cas intéressant correspond à l'existence d'un gradient notable de champ magnétique. Alors, on peut assimiler l'effet de ce gradient à une force $\vec{F} = -\mu \vec{\nabla} \vec{B}$, où μ représente le premier invariant adiabatique. La vitesse de dérive obtenue décroît suivant le carré de l'intensité du champ magnétique et dépend du signe de la charge. Ce cas se rencontre dans la magnétosphère terrestre lorsque les particules reviennent depuis le côté nuit vers le côté jour de la Terre : l'intensité du champ est de plus en plus grande à l'approche de la Terre. Au mouvement de spirale se rajoute une séparation des charges dans une direction perpendiculaire à la fois au champ et à son gradient, ce qui génère l'anneau de courant du chapitre 2.

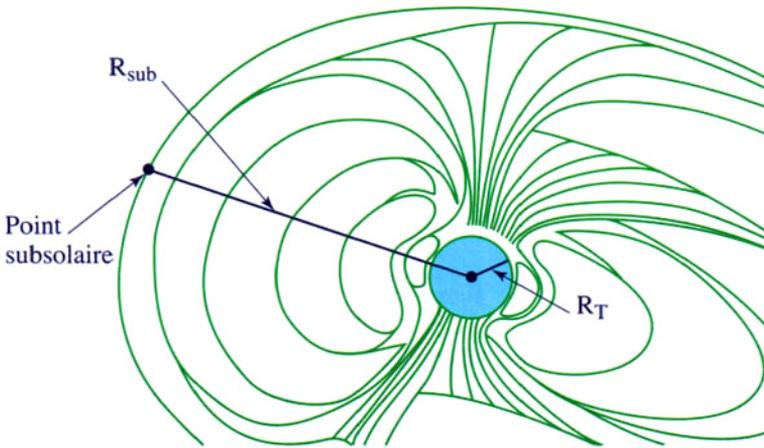
On peut approfondir l'étude de ces dérives en présence de forces en consultant l'ouvrage suivant :

Physique des plasmas (2 tomes), J.L. DELCROIX et A. BERS, CNRS Editions, coll. Savoirs actuels.

Annexe 18

CALCUL DE LA POSITION DE LA MAGNÉTOPAUSE

La position de la magnétopause est déterminée par l'équilibre entre la pression cinétique du vent solaire et la pression magnétique du champ terrestre. Calculons la position de la magnétopause dans l'axe Terre-Soleil. Ce point s'appelle le point subsolaire. La figure ci-dessous rappelle la forme de la magnétosphère, et montre le lieu où le calcul suivant s'applique.



La pression cinétique du vent solaire s'écrit (voir annexe 10) :

$$p_{vs} = n_{vs} k_B T_{vs}$$

k_B est la constante de Boltzmann. Les indices vs signifient "vent solaire", et T_{vs} est la température moyenne du vent solaire. Dans la pression cinétique exercée par le vent solaire, les électrons, 1 836 fois plus légers que les protons, sont négligés et seuls les protons sont conservés. n_{vs} représente donc la concentration des ions du vent solaire (en moyenne $5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$). Nous supposons qu'ils se meuvent à une vitesse v_{vs} (de $370 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$). On peut alors exprimer leur énergie cinétique en fonction de la vitesse quadratique moyenne :

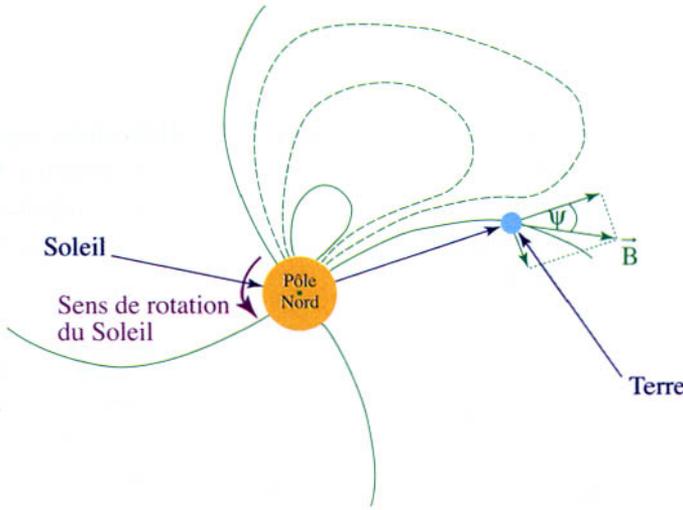
$$E = \frac{1}{2} m_{vs} \overline{v_{vs}^2}$$

Comme l'énergie des particules gelées dans le champ magnétique interplanétaire est $E = k_B T_{vs}$, la pression du vent solaire s'écrit :

$$p_{vs} = \frac{1}{2} n_{vs} m_{vs} \overline{v_{vs}^2}$$

Si l'on tient compte de la spirale d'Archimède (voir chapitre 1), c'est-à-dire de l'angle θ entre le vent solaire et l'axe Terre-Soleil, p_c devient :

$$p_{vs} = \frac{1}{2} \cos^2 \theta n_{vs} m_{vs} \overline{v_{vs}^2}$$



Comme introduit en annexe 10, la pression magnétique s'écrit :

$$p_{\text{magn}} = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

Si l'on retient pour le champ B la variation dipolaire décrite en annexe 4, en un point R (exprimé en rayons terrestres), connaissant la valeur B_T du champ à la surface R_T (environ 5×10^{-5} T), on a la relation : $BR^3 = B_T R_T^3$. La pression magnétique devient alors :

$$p_{\text{magn}} = \frac{1}{2\mu_0} B_T^2 \frac{R_T^6}{R^6}$$

La distance R_{sub} à partir du centre de la Terre du point subsolaire, où le vent est arrêté par le champ, est donné par l'égalité $p_{vs} = p_{\text{magn}}$. On en déduit :

$$R_{\text{sub}} = \left[\frac{B_T^2}{\mu_0 \cos^2 \theta n_{vs} m_{vs} \overline{v_{vs}^2}} \right]^{\frac{1}{6}} R_T$$

Avec les valeurs numériques données antérieurement, et pour un angle θ de $62,6^\circ$, ce calcul donne une distance d'environ 12,5 rayons terrestres. C'est la position moyenne du point subsolaire.

Annexe 19

LES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE SOUS LES FEUX DU SOLEIL

Le chapitre 2 permet de connaître quelques grandeurs caractéristiques des planètes du système solaire. Puis le chapitre 3 montre comment l'activité solaire influe sur notre environnement géophysique. La question de l'interaction entre le Soleil et les environnements magnétisés des autres planètes ne s'est posée que récemment, et a conduit à des bouleversements de notre conception des planètes. Outre son intérêt purement géophysique, elle apporte des connaissances sur notre propre environnement et sur son devenir.

Le tableau ci-dessous présente quelques données caractéristiques des planètes magnétisées du système solaire.

*Paramètres des planètes du système solaire
en relation avec la météorologie de l'espace*

	Période de rotation (heures)	Moment magnétique par rapport à celui de la Terre	Champ magnétique à l'équateur [10^{-4} T]	Angle de l'axe du dipôle/axe de rotation	Concentration moyenne du vent solaire ($e^- + p^+$) [cm^{-3}]	Distance théorique* du point subsolaire de la magnétosphère**	Distance réelle*** du point subsolaire de la magnétosphère**
Mercur e	1404	4×10^{-4}	2×10^{-3}	?	45-100	1,3 R_M	1,6 R_M
Terre	24	1	0,31	11,3°	10	12,5 R_T	11 R_T
Jupiter	9,9	20	4,28	-9,6°	0,4	30 R_J	50-100 R_J
Saturne	10,7	600	0,22	0°	0,1	14 R_S	16-22 R_S
Uranus	7,2	50	0,23	-59°	0,03	18 R_U	18 R_U
Neptune	16,1	25	0,14	-47°	0,005	18 R_N	23-16 R_N

* calculée selon la formule de l'annexe 18.

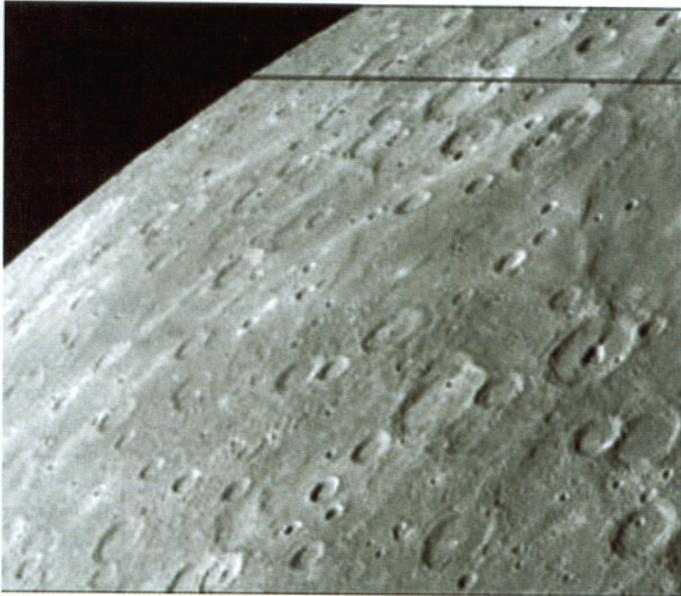
** exprimée en rayon planétaire.

*** tient compte de la spirale d'Archimède et d'un coefficient de porosité de la magnétosphère dont il n'a pas été fait mention ici.

On constate immédiatement que Vénus et Mars n'apparaissent pas dans la liste car elles ne possèdent pas (ou plus) de champ magnétique. Le champ de Jupiter est le plus imposant, près de 14 fois plus intense que celui de la Terre. La Terre et les autres planètes géantes sont très comparables du point de vue magnétique, en dépit de la grande diversité des dimensions planétaires, ce qui révèle des différences de structure interne importantes.

Passons ces planètes en revue du point de vue de leur situation sous les feux du Soleil.

Mercury, à 0,357 UA du Soleil, possède une atmosphère peu dense. Sa densité est proche de celle de la Terre, mais sa taille fait davantage penser à celle de la Lune. L'impact majeur du vent solaire a été de souffler l'atmosphère primordiale de Mercure, effet dévastateur de la météorologie de l'espace local. Aujourd'hui, la pression atmosphérique est 100 milliards de fois plus faible que la pression atmosphérique terrestre.



Mercury, photographiée lors d'un survol de la capsule américaine Mariner 10 (crédit NASA/JPL/Northwestern University).

Les quelques particules de gaz en présence dans l'atmosphère diffuse de Mercury sont de l'Hélium, des traces d'Argon, de Sodium et de Néon. En outre, cette planète possède un champ magnétique dipolaire de faible intensité. Certaines particules du vent solaire font donc autour d'elle le même voyage que celui décrit dans le chapitre 2 pour le cas de la Terre, hormis le fait qu'il n'y a pas de gaz en quantité suffisante pour les ralentir. Ces particules s'écrasent donc sur le sol de Mercury. Si cette réaction était électroluminescente, l'aurore sur Mercury serait une aurore de roche ! Lors de fortes éruptions solaires, la situation est plus étrange encore : le vent solaire est tellement intense qu'il comprime le champ magnétique de Mercury suffisamment pour que le

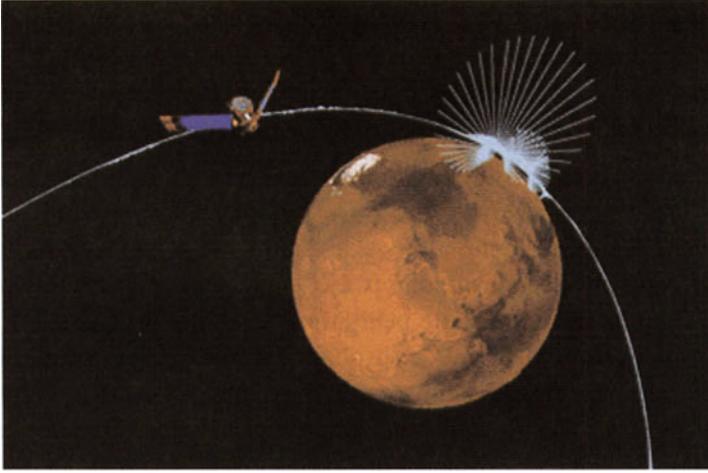
point subsolaire (voir annexe 18) de la magnétopause passe du côté nuit de la planète, laissant ainsi électrons et protons solaires s'écraser directement sur le sol. En dépit de sa proximité avec la Terre, Mercure reste mal connue. La raison est sa faible distance par rapport au Soleil, qui rend difficile une approche spatiale. Les choses pourraient changer bientôt, l'Agence Spatiale Européenne ayant fait de cette petite planète une priorité des missions futures.

Vénus réserve une surprise : elle n'a pas de champ magnétique significatif et donc pas de magnétosphère. Cependant, elle possède une atmosphère dense, composée à 96% de CO. Comme cette molécule peut être ionisée par les radiations solaires de l'extrême ultraviolet, il existe une ionosphère diurne. Le vent solaire ne peut pas pénétrer dans l'atmosphère de Vénus car l'ionosphère elle-même agit comme un bouclier. Les quelques électrons du vent solaire qui arrivent à franchir cette barrière créent une légère excitation : l'ovale auroral se résume en un croissant diurne, comme a pu l'observer le spectromètre ultraviolet du satellite américain Orbiter.



Le 1^{er} mars 1982, la station russe Venera 13 se pose à la surface de Vénus, à 7,5° de latitude sud et 303° de longitude est. Venera possédant une caméra couleur, elle a travaillé pendant 2 heures et 7 minutes avant de s'éteindre. Elle a obtenu 14 images de la surface de la planète. Au bas de celle-ci, on distingue une partie de la sonde spatiale.

Mars a de tous temps fasciné les astronomes. Son atmosphère est composée de CO₂ à 95%. La pression atmosphérique est cent à cinq cents fois plus faible que sur la Terre. En 1997, la sonde Mars Global Surveyor a montré que Mars a possédé un champ magnétique, dont furent mesurées les réminiscences locales, retenues dans la roche ferromagnétique. Ce champ a pu s'éteindre ou bien, par un hasard extraordinaire, on se trouve actuellement dans une période d'inversion de champ magnétique sur Mars, comme il en existe sur la Terre. Par ailleurs, l'atmosphère de Mars s'ionise, et les ions peuvent être emmenés par le vent solaire. L'atmosphère de la planète a pu se vider au cours des millénaires de cette façon, ce qui serait l'un des effets spectaculaires de la météorologie de l'espace, et pourrait en retour permettre de mieux prédire l'avenir de l'ionosphère terrestre. Les prochaines expériences spatiales en diront plus sur ce sujet.



Mars, survolée par la sonde Mars Global Surveyor, en 1998. Cette sonde a mis en évidence un champ magnétique rémanent sur la surface de la planète. C'est ce champ, local, qui est indiqué en bleu sur l'image (crédit NASA).

Jupiter possède un champ magnétique à son image : dix fois plus intense que le champ terrestre. En raison de son importante gravité, la planète a pu retenir l'atmosphère de



Ce montage (en fausses couleurs) montre les ovales auroraux sud et nord de Jupiter, photographiés dans l'ultraviolet et superposés à une photographie dans le visible. La tache blanche à gauche est le satellite Io, en transit (crédit FOC-HST ; L. Pallier et R. Prangé, IAS Paris).

gaz primordial du système solaire, fait surtout d'hydrogène et d'hélium¹. Les ovales auroraux de Jupiter ont été observés par plusieurs instruments, dont la Faint Object Camera de l'ESA à bord du télescope spatial de la NASA. Ils ne sont hélas pas visibles à l'œil, car ils émettent dans l'ultraviolet. Sur le montage de la figure précédente, ils ont été superposés à une photographie dans le visible au même instant.

Une spécificité de l'ionosphère de Jupiter est due à la présence de Io, un satellite volcanique, soufflant du dioxyde de soufre dans l'espace. Ce gaz est également ionisé par les ultraviolets solaires, laissant un tore de plasma conducteur. Les particules ionisées sont piégées par le champ magnétique de Jupiter, et contraintes de le suivre jusqu'à se précipiter dans son atmosphère. Alors, comme les particules du vent solaire, elles excitent et ionisent le gaz qu'elles rencontrent, qui retourne à l'équilibre en particulier en émettant de la lumière. C'est cette trace, celle de Io, qui est parfaitement reconnaissable sur la figure, décalée vers l'équateur par rapport à l'ovale lui-même. Par ailleurs, les mesures de la sonde américaine Galileo montrent que Io posséderait son propre champ magnétique, tout comme Ganymède, un autre satellite de Jupiter. Le champ magnétique de ce dernier est sans ambiguïté, puisqu'il est cinq fois plus intense que le champ local moyen de Jupiter, à peine 500 fois plus faible que celui de la Terre. Il fut découvert le 7 décembre 1996, et les résultats furent rapidement publiés dans le journal *Nature*. L'intérêt énorme de cette découverte tient à ce qu'en raison de leurs masses faibles, personne n'imaginait que les satellites joviens pouvaient avoir le noyau métallique nécessaire à la présence d'un champ magnétique.

A l'approche d'Europe, les magnétomètres ont également mesuré une augmentation du champ magnétique local, certes très faible, 5 000 fois moindre que celui de la Terre. Près de Callisto, un champ cinq fois plus faible encore a été mesuré.

Ces découvertes ont déjà une légende. Lorsque la sonde Galileo a décollé, il s'est avéré que son antenne principale ne s'était pas bien déployée. Il ne restait plus qu'une antenne de secours pour transmettre les données. Le temps que le satellite arrive à destination, les ingénieurs ont travaillé d'arrache-pied pour compresser les données à envoyer. Cependant, il n'était plus possible de faire tourner en même temps toutes les expériences embarquées : les données ne pouvaient pas être toutes transmises. On décida donc de couper le magnétomètre à l'approche des satellites joviens, tant on était persuadé qu'ils ne pouvaient pas posséder de champ magnétique. La légende veut qu'un opérateur ait oublié d'éteindre l'instrument lors du survol de Io (cela se fait par télécommande, naturellement).

1 Les atmosphères de Vénus, de la Terre et de Mars sont issues de phénomènes complexes ayant eu lieu après la formation des planètes. Les atmosphères des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) sont les atmosphères déjà présentes lors de leur formation.

Discovery of Ganymede's magnetic field by the Galileo spacecraft

M. G. Kivelson*†, K. K. Khurana*, C. T. Russell*†,
R. J. Walker*, J. Warnecke*, F. V. Coroniti‡,
C. Polansky§, D. J. Southwood*|| & G. Schubert*†

* Institute of Geophysics and Planetary Physics, † Department of Earth and Space Sciences, ‡ Department of Physics, University of California, Los Angeles, California 90095-1567, USA

§ Jet Propulsion Laboratory, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, California 91109, USA

|| Department of Physics, Imperial College of Science, Technology, and Medicine, London SW7 2BZ, UK

THE Galileo spacecraft has now passed close to Jupiter's largest moon—Ganymede—on two occasions, the first at an altitude of 838 km, and the second at an altitude of just 264 km. Here we report the discovery during these encounters of an internal magnetic field associated with Ganymede (the only other solid bodies in the Solar System known to have magnetic fields are Mercury, Earth and probably Io¹). The data are consistent with a Ganymede-centred magnetic dipole tilted by $\sim 10^\circ$ relative to the spin axis, and an equatorial surface-field strength of ~ 750 nT. The magnetic field is strong enough to carve out a magnetosphere with clearly defined boundaries within Jupiter's magnetosphere. Although the observations require an internal field, they do not indicate its source. But the existence of an internal magnetic field should in itself help constrain models of Ganymede's interior.

On Galileo's first inbound pass following orbital insertion, the magnetometer² measurements followed reasonably closely the predictions from a recent model of the magnetic field of Jupiter's magnetosphere³ that we refer to as the KK96 model. (This model consists of the O6 model⁴ of Jupiter's internal field plus the field of a warped and hinged current sheet parametrized to fit the magnetic field measured on the Pioneer 10 outbound pass near the dawn meridian.) The field increased in magnitude with approach to Jupiter and varied in orientation at Jupiter's rotation period. Data from 00:00 UT (universal time; h:min) to 12:00 UT on

537

Le 12 décembre 1996, le journal Nature publie la découverte du champ magnétique de Ganymède. Comme le précise M. Kivelson et ses co-auteurs, à ce moment, le champ magnétique de Io n'est qu'hypothétique (reproduit avec l'autorisation du journal Nature, copyright 1996, Macmillan magazines Ltd).

Saturne aussi possède à la fois un champ magnétique et une atmosphère dont la composition est proche de celle de Jupiter. L'axe de son champ magnétique est à peu près le même que l'axe géographique, ce qui est un cas unique dans le système solaire. Son ovale auroral a été observé pour la première fois en 1995 par la Faint Object Camera, instrument de l'Agence Spatiale Européenne à bord du télescope spatial Hubble.



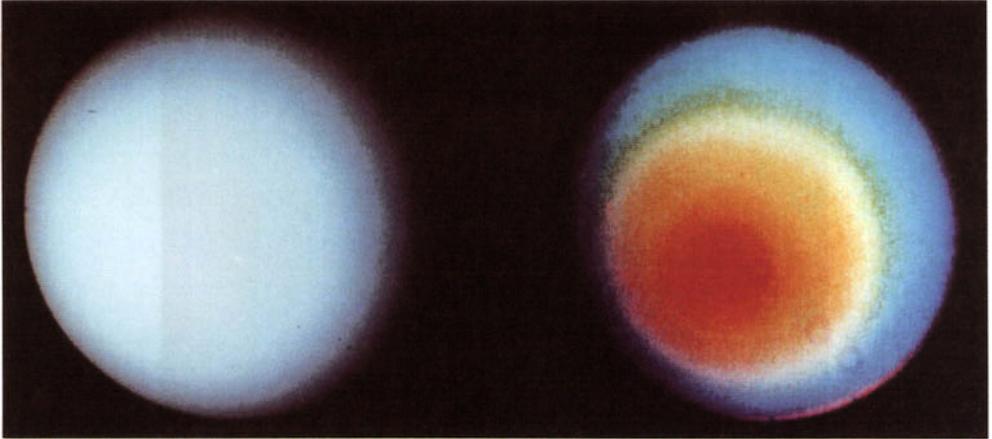
Non moins spectaculaire cliché montrant les ovales auroraux sud et nord de Saturne, photographiés par le télescope spatial Hubble (crédit STIS-NASA).

L'étude de Saturne est compliquée par la présence de ses anneaux, mais aussi et surtout par la présence de Titan. Titan est un satellite qui a sa propre atmosphère mais pas de champ magnétique connu ². La composition de son atmosphère présente la particularité d'être proche de celle de la Terre. La composition terrestre est d'environ deux tiers d'azote moléculaire pour un tiers d'oxygène. Sur Titan, le rapport est de deux tiers d'azote moléculaire pour un tiers de méthane. Cette analogie fait rêver : Titan pourrait-elle nous renseigner sur les conditions prébiotiques, celles qui prévalaient avant l'émergence de la vie sur Terre ? Possédant une atmosphère, Titan a aussi une ionosphère. Cette planète géante et son satellite mystérieux seront explorés par le projet Cassini Huygens de l'ESA et de la NASA dans les premières années du 21^e siècle.

Uranus est peut-être plus surprenante encore : son pôle nord géographique pointe vers le Soleil, mais le pôle magnétique est presque dirigé comme celui de la Terre. Jusqu'à ce que cela soit mesuré par Voyager, la compréhension générale d'un champ magné-

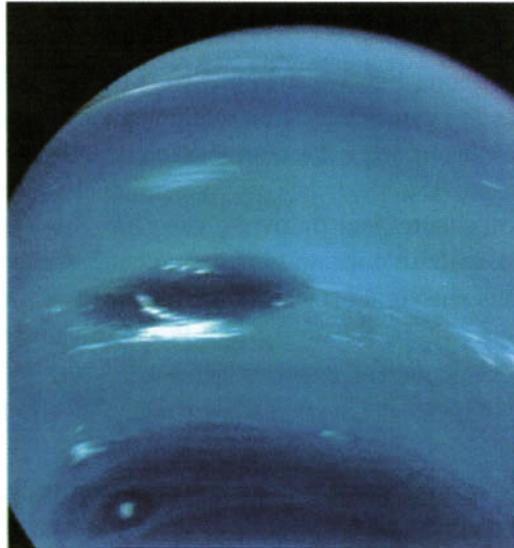
2 Depuis GALILEO, la prudence impose de ne plus faire de prédiction sur ce sujet brûlant !

tique planétaire imposait que son axe soit grossièrement aligné sur celui de la rotation de la planète, et personne n'avait envisagé cet écart de 55° . Le satellite Voyager a également détecté une aurore nocturne sur Uranus, près de son pôle magnétique.



A gauche, Uranus telle qu'elle est apparue le 17 janvier 1986 à la sonde américaine Voyager 2, navigant à 9,1 millions de kilomètres de distance. A droite, un codage des couleurs fait apparaître l'ovale auroral de la planète (crédit NASA/JPL).

Neptune constitue une autre étape de notre étonnement. L'angle d'inclinaison de l'axe de rotation sur l'écliptique est de 29° , avec un axe magnétique à 45° de son axe géographique. Le vent solaire entre donc directement dans la calotte polaire. Elle a aussi une atmosphère. C'est à peu près tout ce que nous savons...



Le 21 août 1989, Voyager 2 croise Neptune et photographie son atmosphère à seulement 6,1 millions de kilomètres, révélant la grande tache sombre, un cyclone et des vents de plus de 600 kilomètres par heure (crédit NASA/JPL).

Pluton : ... et c'est déjà beaucoup par rapport à Pluton, dont on ne sait rien encore concernant les aurores polaires. Gageons que les planètes extrasolaires que nous commençons à découvrir constitueront de nouvelles surprises.

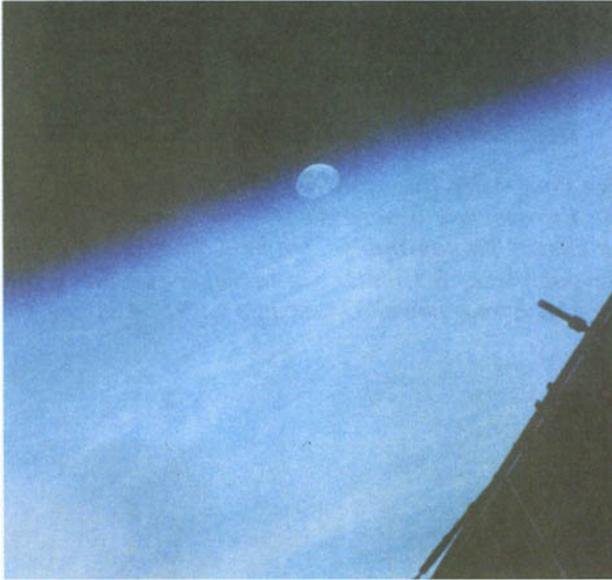


Avant cette image composite (juin/juillet 1994) de la caméra à grand champ de l'Agence Spatiale Européenne à bord du télescope spatial Hubble, la surface de Pluton n'avait jamais été photographiée. On ne s'attendait pas à de tels contrastes, révélant un objet complexe, à l'image de la Terre (crédit A. Stern – Southwest Research Institute ; M. Buie – Lowell Observatory ; NASA et ESA).

Annexe 20

LA LUNE SOUS LES FEUX DU SOLEIL

La présence de la Lune, même si cela n'est qu'anecdotique pour la météorologie de l'espace, est un fait assez marquant pour être souligné. Nous n'allons pas étudier ici la Lune en détail, mais donner quelques éléments concernant ses relations avec le Soleil.



*La Lune se lève au-dessus de l'atmosphère terrestre.
(crédit J.P. Haignéré, CNES)*

La distance de la Terre à la Lune est de 384 400 kilomètres, soit un peu plus de soixante rayons terrestres. Cette valeur fait que la Lune ne se trouve pas protégée par la magnétosphère terrestre, comme le sont les satellites de Jupiter, mais est directement exposée au vent solaire. Une curiosité du système solaire est que la distance Terre-Lune est 400 fois plus faible que la distance Terre-Soleil, dans les mêmes proportions que le rapport entre le diamètre de la Lune (3 476 kilomètres) et celui du Soleil (1 392 000 kilomètres) si bien que, vues de la Terre, le satellite et l'étoile ont sensiblement la même taille apparente. Ce hasard permet d'admirer des éclipses totales de Soleil, comme celle du 11 août 1999, visible depuis le nord de la France.

Ces proportions respectées de 400 ne doivent pas nous étonner outre mesure, car elles ne sont que conjoncturelles. En effet, la Lune s'éloigne de la Terre à raison d'environ 4 mètres par siècle (voir annexe 13), de telle sorte que nos lointains descendants ne pourront plus voir d'éclipse totale, la Lune leur apparaissant de plus en plus petite. Quant aux animaux vivant il y a 650 millions d'années, ils ne pouvaient certainement pas admirer d'éclipse annulaire, car la distance Terre-Lune était d'environ 58,4 rayons terrestres, contre 60,4 aujourd'hui. Le rapport 400 est donc un rapport fugitif au sens des âges astronomiques. Le fait que nous soyons là au "bon" moment n'est qu'un hasard.



L'ombre de la Lune se projette sur la Terre, lors de l'éclipse du 11 août 1999. La prise de vue se fait depuis la station spatiale MIR, au cours de la mission scientifique et technologique Perseus (crédit J.P. Haignéré, CNES).

Notons enfin une récente découverte due à l'astronome Jacques LASKAR, du bureau des longitudes à Paris. Selon ses modèles de mouvement céleste, l'axe de rotation de la Terre n'est pas stable. En effet, il y a davantage de continents au nord de la planète qu'au sud. La différence de masse suffit à créer un léger déséquilibre. Que Jupiter passe derrière le Soleil, et l'axe de rotation de la Terre peut se déporter vers elle sous l'effet conjugué de leurs gravités¹. Un peu plus tard, une autre configuration du

¹ Nous avons déjà indiqué que la force d'attraction gravitationnelle exercée l'une sur l'autre par deux masses m et m' ponctuelles ou de symétrie sphérique, séparées d'une distance d , est une force d'intensité $F = G \frac{mm'}{d^2}$, où G est la constante universelle de la gravitation qui vaut $6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

système solaire peut faire pencher la Terre d'un autre côté. La vie sur une telle planète serait très certainement difficile, voire impossible ! Or, d'après J. LASKAR, c'est la Lune qui stabilise la Terre. Inéluctablement, leur éloignement respectif deviendra tel que l'effet stabilisateur disparaîtra : c'est une des possibilités pour la fin de notre civilisation.

Quels sont les phénomènes de météorologie de l'espace sur la Lune ? Le vent solaire, ainsi que le rayonnement cosmique de haute énergie heurtent directement la Lune puisque son orbite se trouve hors de la magnétosphère terrestre. Ne possédant pas d'atmosphère protectrice, elle est également à la merci des micro-météorites et du rayonnement solaire. Sous l'influence de ces agressions, sa surface est cassée, altérée, et se couvre de poussières qui peuvent être de quelques microns. Au fil du temps a ainsi été créée une couche de 2 à 6 mètres environ d'épaisseur que l'on appelle un régolite. Un effet de "jardinage" implique que, comme dans les champs cultivés de nos campagnes, des pierres de sous-sol peuvent se retrouver à la surface. On estime que ce mouvement interne du régolite est de l'ordre de 1 mètre par milliard d'années.

Le régolite constitue une archive unique dans le système solaire de l'histoire du milieu interplanétaire : il n'y a pas, comme sur la Terre, de tectonique des plaques pour mélanger et faire disparaître les couches. La lecture de cette archive permet de surcroît de discriminer les sources d'altération de la surface car plus on monte en latitude, moins le vent et le rayonnement solaires ont d'effet. Les pôles en particulier ne sont exposés qu'au rayonnement cosmique et aux micro-météorites.

Annexe 21

COMÈTES, MÉTÉORES ET ASTÉROÏDES SOUS LES FEUX DU SOLEIL

La Terre, la Lune (voir annexe 20) et les planètes (voir annexe 19) ne sont pas les seuls corps présents dans le système solaire. D'autres astres y circulent : les comètes, les météores et les astéroïdes.

Comètes

Les comètes sont des petits corps glacés qui voyagent dans le système solaire. Elles sont probablement des témoins de la formation du système solaire et constituent, aux confins du système solaire – entre 20 000 et 50 000 UA¹ –, une sphère ténue qui porte le nom de nuage de Oort. C'est J.H. OORT qui a postulé son existence dans les années 1950 en se fondant sur l'analyse des trajectoires d'une vingtaine d'entre elles. On estime que le nombre de noyaux de comètes qui seraient contenus dans ce nuage se situerait entre 100 et 1 000 milliards. Il existe un second réservoir de comètes, avec une forme d'anneau plat s'étendant des orbites de Neptune et Pluton jusqu'à la frontière interne du nuage de Oort : la ceinture de Kuiper. Elle pourrait contenir dix fois plus de noyaux cométaires que le nuage de Oort.

Les noyaux cométaires ont une forme très irrégulière, "patatoïde". Ils sont composés de glace, principalement de glace d'eau, avec des traces d'ammoniac, de méthane, de dicyanogène, d'oxyde de carbone. On y trouve également des minéraux. Leur diamètre est très variable, compris entre 1 et 100 kilomètres, pour une masse variant entre 10¹¹ et 10¹³ kilogrammes.

Ils sont soumis à des forces de gravitation créées par les étoiles environnantes, par le Soleil et par les planètes du système solaire. Selon les orbites respectives des uns et des autres, la force de gravitation qui s'exerce sur un noyau particulier varie dans le temps. De plus, des collisions peuvent se produire entre noyaux à l'intérieur du nuage de Oort ou de la ceinture de Kuiper. Ces deux effets entraînent la sortie de certains noyaux de leur réservoir, vers le Soleil ou vers l'espace externe au système solaire.

¹ Cette distance représente un peu moins de la distance qui sépare le Soleil de l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure.

Nous ne connaissons que les comètes dont le périhélie se situe à des distances comparables à celles de l'orbite de Jupiter. Leur orbite est soumise aux lois de Kepler (voir annexe 12), mais est perturbée par le passage à proximité des planètes. Par exemple, la période de la comète Lexell est passée de 11,4 à 5,6 ans en 1770, puis à 174,3 ans neuf années plus tard.

Certaines comètes ont des orbites dites "à courte période", c'est-à-dire moins de 200 ans. C'est le cas bien sûr de la plus connue d'entre elles, la comète de Halley, dont la période est de 76 années, mais aussi de 55 autres dont on a observé plus d'une apparition.

Jupiter en particulier, de par sa masse élevée, exerce une action importante, sans doute protectrice pour les autres planètes du système solaire. On se souvient de la comète de Shomaker-Levy qui, en juillet 1994, s'est précipitée sur Jupiter, en se fractionnant avant l'impact. Le Soleil constitue un autre cimetière pour un nombre élevé de comètes, comme l'a montré récemment le satellite SOHO (voir chapitre 1).

Les noyaux cométaires qui s'approchent du Soleil dégazent sous l'effet de l'augmentation de température, et s'entourent d'une "chevelure" composée de molécules (CO, CN, C₂, C₃, CH, NH₂, OH...) neutres en concentration extrêmement réduite : de l'ordre de 10⁴ à 10⁶ cm⁻³. Ce gaz, insensible au champ magnétique interplanétaire, diffuse dans le vent solaire sur des distances pouvant atteindre 10 000 à 100 000 kilomètres. On donne le nom de "coma" à la partie de la chevelure qui fait face au Soleil. Du côté opposé au Soleil, la chevelure se scinde en deux queues dont les origines physiques sont différentes.

La première queue est due au rayonnement ultraviolet solaire et au bombardement des particules de haute énergie du vent solaire. La chevelure est excitée et ionisée sous leur impact², sur le côté de la comète exposé au Soleil, de façon tout à fait similaire au gaz atmosphérique de la Terre (voir chapitre 2), créant une coma de plasma encore très mal connue : l'ionosphère cométaire, faite d'ions lourds et excités. La désexcitation se fait sous la forme d'émission lumineuse, en particulier dans le visible : le noyau cométaire devient comète, en acquérant une chevelure et un éclat. Lors d'événements éruptifs solaires, cet éclat se trouve notablement augmenté. Les ions formés dans la coma sont sensibles au champ magnétique interplanétaire, qu'ils suivent en donnant naissance à la queue ionisée.

La seconde queue cométaire est neutre, et trouve son origine dans l'interaction de la chevelure avec le vent solaire de faible énergie, et avec le rayonnement aux grandes longueurs d'onde. Ceux-ci n'ont pas d'influence sur le noyau cométaire, mais souf-

2 A ces deux processus d'ionisation s'en ajoute un troisième, l'ionisation "critique" découverte par ALFVEN en 1960. Le plasma magnétisé du vent solaire pénètre dans le gaz neutre de la chevelure, à une vitesse suffisante pour que l'énergie cinétique des neutres par rapport au plasma devienne supérieure à leur énergie d'ionisation.

flent sur la chevelure pour former la queue cométaire neutre, toujours disposées à l'opposé de la direction Soleil-comète³.

Les queues atteignent plusieurs millions de kilomètres, pour une largeur inférieure au million de kilomètres. Elles sont constituées de gaz, et de poussières expulsées de la comète lors du dégazage. La queue de poussière et de gaz neutre réfléchit la lumière solaire sans en émettre. Elle est souvent de couleur jaunâtre. La queue de plasma émet un rayonnement propre, caractéristique des éléments ionisés dont elle est constituée. La spirale d'Archimède (voir chapitre 1) du vent solaire contribue à déformer la queue de plasma pour lui donner une forme hélicoïdale, tandis que la gravité exercée par le Soleil déforme la queue de poussière.



La comète Hale-Bopp se détache au-dessus d'une aurore verte. On distingue sa queue de plasma (crédit Jan Curtis, Alaska Climate Research Center, à Fairbanks en Alaska).

Météores

Les météores sont des petits cailloux, jusqu'à quelques mètres de diamètre, qui gravitent dans le système solaire. Les météores et météorites sont connus par le phénomène d'étoile filante qu'elles provoquent en pénétrant dans l'atmosphère terrestre : elles s'y échauffent, deviennent incandescentes et visibles. La nomenclature est quelque peu confuse. On distingue cependant les météores qui provoquent le

³ Les photons transportent de la quantité de mouvement qu'ils transfèrent à la matière ce qui, rapporté à l'unité de temps, donne lieu à une pression si on rapporte également à l'unité d'aire. Cette pression est appelée "pression de radiation".

phénomène d'étoile filante, des météorites fragments de météores que l'on retrouve au sol. Leur impact sur l'environnement terrestre a été évoqué au chapitre 2 (création d'une couche ionosphérique additionnelle). Le suivi des météores se fait essentiellement à l'aide du radar. On en possède une bonne statistique qui montre de fortes variations journalières et annuelles.

De même que les insectes s'écrasent sur le pare-brise d'une voiture et non sur la lunette arrière, les météores pénètrent dans l'atmosphère de la Terre préférentiellement sur sa "face avant", le long de son orbite, c'est-à-dire plutôt le matin (maximum à 6 TL) qu'à la tombée du jour (minimum à 18 TL). On observe également plus de météores en automne, et lorsque la trajectoire de la Terre coupe des essaims météoritiques : les Perséides (autour du 11 août), les Léonides (au mois de novembre) et d'autres encore moins denses, qui sont des courants de poussières circulant autour du Soleil, souvent produits par la désintégration de comètes.

Astéroïdes

Les derniers des "petits" corps présents dans le système solaire sont les astéroïdes. Il s'agit de gros cailloux, d'une taille bien supérieure à la taille des météores, planètes avortées du système solaire. On en compte plus de 10 000, mais on estime leur nombre à plusieurs millions. Ceres, le plus gros astéroïde connu, a un diamètre de 1 003 kilomètres. Les astéroïdes se répartissent en deux régions principales : une ceinture située entre les orbites de Mars et de Jupiter, et la ceinture de Kuiper qu'elles occupent avec les comètes, au-delà des orbites de Neptune et Pluton. Pluton elle-même pourrait être un gros astéroïde en orbite planétaire, et Chiron, son compagnon, une comète ayant fini son dégazage, capturée par Pluton⁴.

On pourra, pour approfondir, consulter les ouvrages suivants :

Météores et effets lumineux dans l'atmosphère terrestre, E. BIÉMONT, PUF.

Les Comètes et les astéroïdes, P. DE LA COTARDIÈRE et A.C. LEVASSEUR-REGOURD, Editions du Seuil, coll. Points Sciences, n°117.

Ces Pierres qui tombent du ciel, J.P. LE POIRIER, Editions Le Pommier.

4 Il s'agit d'une théorie qui permettrait d'expliquer les observations du satellite HUBBLE, en 1990. Selon ces observations, Pluton, avec une densité de $2,13 \pm 0,04$ serait composé pour les trois quarts de roche et pour un quart de glace. Charon, de densité beaucoup plus faible ($1,30 \pm 0,23$), serait composé essentiellement de glace.

Annexe 22

PARAMÈTRES ORBITAUX

Tout comme les planètes autour du Soleil, les satellites artificiels tournent autour de la Terre suivant une ellipse décrite par les lois de Kepler (voir annexe 12). Pour connaître la position d'un satellite, il faut six paramètres qui déterminent son orbite et la façon de la parcourir.

L'orbite elle-même est déterminée par trois paramètres : l'apogée, le périhélie et l'excentricité. L'apogée est la distance la plus grande de l'orbite à la Terre, le périhélie est la distance la plus petite et l'excentricité de l'ellipse caractérise son aplatissement. L'excentricité vaut 1 dans le cas d'une droite et 0 dans celui d'un cercle. Elle est définie par :

$$\varepsilon = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

où $2a$ est le grand axe de l'ellipse, et $2b$ son petit axe. L'aplatissement est défini par :

$$\alpha = \frac{a - b}{a}$$

de telle sorte que :

$$\varepsilon = 1 - (1 - \alpha)^2$$

La figure ci-après montre l'orbite d'un satellite autour de la Terre. Certains paramètres définissant l'orbite dépendent du repère de référence. On choisit ce repère comme suit :

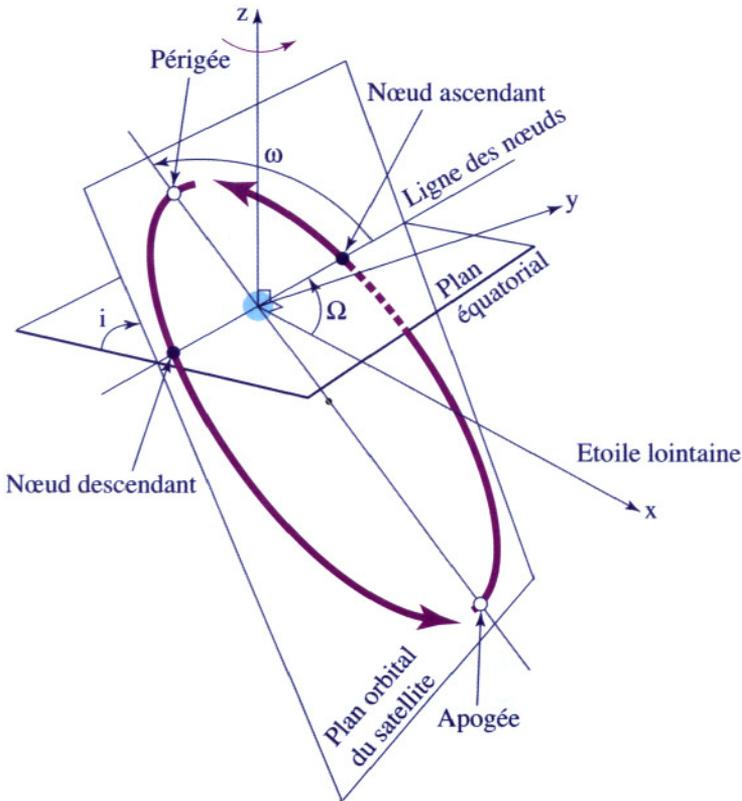
- ♦ le centre est le centre de la Terre ;
- ♦ l'axe z est celui des pôles géographiques, c'est-à-dire l'axe de rotation de la Terre autour d'elle-même, orienté du sud vers le nord ;
- ♦ le plan xOy est le plan équatorial. L'axe x est fixé de façon arbitraire, par exemple en pointant une étoile lointaine, et l'axe y forme un trièdre direct avec Oz et Ox .

En parcourant son orbite, le satellite coupe le plan Oxy équatorial en deux points appelés les nœuds. Le nœud est ascendant dans le sens de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord, et descendant dans le sens inverse (où l'on voit une représentation de la planète marquée par l'hégémonie de l'hémisphère nord). La droite qui joint les nœuds dans le plan équatorial s'appelle simplement la ligne des nœuds. Vers le nœud

ascendant, la ligne des nœuds fait avec l'axe Ox un angle Ω qu'on appelle l'ascension droite, et qui peut varier dans le temps.

Le plan dans lequel l'orbite est contenue fait avec le plan équatorial un angle i qu'on appelle l'inclinaison. Elle vaut 0 dans le cas d'un satellite en orbite équatoriale et 90° dans le cas d'un satellite en orbite polaire. Etant comptée dans l'hémisphère nord, elle peut être positive ou négative (voir figure).

Enfin, l'argument du périégée ω est l'angle que fait la droite du grand axe (du côté du périégée) avec la ligne des nœuds.



Ces six paramètres (périégée, apogée, ε , Ω , i , ω) définissent l'orbite et le sens selon lequel elle est parcourue. Pour connaître l'orbite d'un satellite à un instant donné, il suffit donc théoriquement de connaître ces six paramètres et l'angle entre la droite reliant le satellite à l'origine O et la ligne des nœuds. Dans la réalité, cela se complique un peu en raison de l'irrégularité de la Terre qui déforme l'ellipse des lois de Kepler. Notons toutefois que l'altitude n'est pas un paramètre orbital. En effet, elle varie au cours du mouvement, et est très difficile à déterminer avec précision.

Le calcul et la surveillance des orbites de satellites se sont considérablement développés au point de porter à présent le nom générique d'orbitographie. Cette discipline,

qui fait appel aux mathématiques, à la géophysique, à la cinétique et à la modélisation, possède son vocabulaire propre. En voici quelques termes :

- ◆ La trace est la projection de l'orbite sur la Terre.
- ◆ L'inclinaison apparente est l'angle que fait la trace avec l'équateur. Il s'agit donc d'un angle à la surface de la Terre, différent de l'inclinaison orbitale que nous avons décrite ci-dessus.
- ◆ Le phasage permet d'obtenir des conditions identiques de prise de vue à une période régulière, appelée le cycle : la trace est la même, mais pas nécessairement toutes les altitudes de vol.
- ◆ Une orbite est gelée lorsque le satellite est phasé avec les mêmes altitudes de vol entre deux orbites.
- ◆ Le point subsatellitaire est le point sur lequel se projette le satellite à la surface de la Terre.

On donne des noms aux orbites selon divers critères :

- ◆ *Selon l'inclinaison*
 - si l'inclinaison est proche de 0° , l'orbite est dite "équatoriale" ;
 - si l'inclinaison est inférieure à 10° , l'orbite est "quasi-équatoriale" ;
 - de 80° à 100° , l'orbite est quasi-polaire ;
 - à 90° , elle est strictement polaire ;
 - une inclinaison inférieure à 90° correspond à une orbite directe, tandis qu'une inclinaison supérieure à 90° correspond à une orbite rétrograde.
- ◆ *Selon l'altitude*

Bien que l'altitude ne soit pas un paramètre orbital, on distingue les orbites :

 - haute, c'est-à-dire 36 000 kilomètres. L'acronyme anglais est GEO, pour "geostationary" ;
 - moyenne, vers 20 000 kilomètres. L'acronyme anglais est MEO, pour "Medium Earth Orbit" ;
 - basse vers 1 000 kilomètres. L'acronyme anglais est LEO, pour "Low Earth Orbit".
- ◆ *Selon l'endroit où se trouve le satellite*

Cela concerne tout spécialement le point de Lagrange L1. Un satellite en L1 est dit en orbite halo, ou L1 Lissajous (L1 est instable et le satellite y décrit des courbes de Lissajous). L'acronyme anglais est LILO, pour "L1 Lissajous Orbit".
- ◆ *Selon un point de référence*
 - géostationnaire : le satellite vole toujours au-dessus du même point de l'équateur terrestre, à 36 000 kilomètres. Il est caractérisé par sa longitude. Cette orbite est parfois appelée "orbite de Clarke" ;
 - défilant pour un satellite non géostationnaire ;
 - héliosynchrone : cela correspond à un satellite en orbite basse dont le passage à un nœud se fait toujours à la même heure solaire ;

- géosynchrone : le mouvement du satellite autour de la Terre et le mouvement de la Terre autour de son axe se font avec la même pulsation ;
- à dérive d'heure locale : non héliosynchrone.

◆ *Selon l'excentricité*

Une orbite est circulaire si son excentricité est proche de 0 (par exemple 0,01) et elliptique autrement.

Les orbites portent parfois le nom des satellites précurseurs. Ainsi, pour les orbites très excentrées, nous avons :

- ◆ Molnya : une ellipse très aplatie (un périégée de 400 kilomètres et une apogée de 40 000 kilomètres environ, ce qui correspond à une excentricité de 0,75). L'acronyme anglais est HEO, pour "Highly Eccentric Orbit".
- ◆ Tundra pour un satellite géosynchrone non géostationnaire.

Pour approfondir le sujet, on pourra consulter l'ouvrage suivant :

Eléments de mécanique céleste, G. PASCOLI, Armand Colin.

Annexe 23

LES INSTRUMENTS DE LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

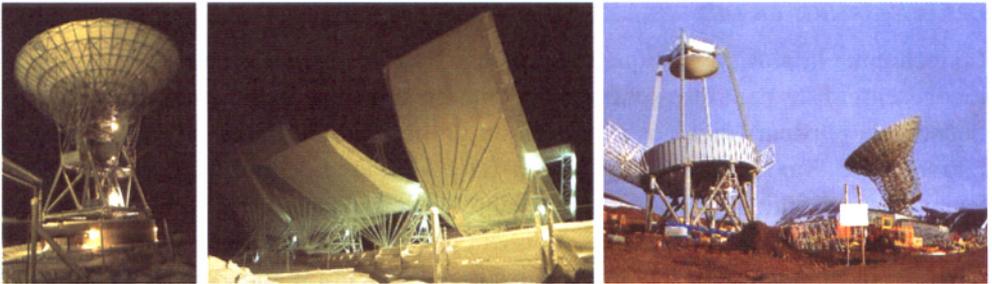
Une liste de tous les outils et instruments de la météorologie de l'espace, outre qu'elle serait fastidieuse, deviendrait rapidement obsolète. L'objectif de cette annexe est de présenter les plus marquants d'entre eux.

Les instruments au sol

La technique la plus sophistiquée de sondage de l'ionosphère s'appelle la diffusion incohérente. Elle peut être schématisée comme suit : les ondes radar de haute fréquence, de plusieurs dizaines à environ un millier de mégahertz, peuvent traverser l'atmosphère. Sur leur trajet, elles forcent les ions et les électrons à tourner autour de leur vecteur d'onde à leur fréquence propre (voir annexes 3 et 17). Cependant, au cours de la rotation, les particules subissent des collisions qui les accélèrent ou les ralentissent, si bien qu'elles tournent à des fréquences qui se répartissent autour de la fréquence d'émission : on dit que les collisions élargissent le spectre électromagnétique. Comme le nombre de collisions varie en fonction de la concentration et de la température du milieu, l'élargissement du spectre observé par le radar permet de calculer la température des ions, des électrons, et la concentration totale en ions. L'effet Doppler (voir annexe 5) permet également de mesurer la vitesse des ions. Ces paramètres de base sont essentiels pour calculer de nombreuses grandeurs atmosphériques : échanges de chaleur, production de particules... Il existe très peu de radars à diffusion incohérente. Deux aux Etats-Unis, dont le géant de Porto Rico (Arécibo) qui possède la plus grande antenne du monde, d'un diamètre de 300 mètres ; un au Pérou (sous contrôle essentiellement américain), un au Japon, et surtout, joyau de la famille, les radars EISCAT et leur petit frère, ESR.

EISCAT est situé juste dans la zone aurorale. Il étudie l'ionosphère depuis août 1981 sur une bande de 10 degrés de latitude, entre 70 et 600 kilomètres d'altitude. Il est composé de trois antennes : l'émetteur-récepteur, une parabole de 32 mètres de diamètre travaillant à Ultra Haute Fréquence qui se trouve à Tromsø (Norvège). Cet émetteur délivre une puissance de 2 mégawatts en impulsions de quelques dizaines de microsecondes. Deux antennes réceptrices de même dimension sont situées à Kiruna (Suède) et Sodankylä (Finlande). Cette configuration unique au monde per-

met d'observer un point de l'atmosphère depuis trois directions différentes. Ainsi les phénomènes sont étudiés en trois dimensions et non pas seulement le long de la ligne de visée. Elle offre aux pays co-fondateurs (la France, la Grande-Bretagne et l'Allemagne à 25% chacun, et les trois hôtes scandinaves pour le dernier quart du financement) une place particulière dans l'étude des plasmas spatiaux. Outre ce radar UHF, EISCAT dispose à Tromsø d'une antenne de 120 mètres de long en quatre pans rectangulaires qui, avec sa fréquence VHF, permet d'effectuer des mesures à plus de 1000 kilomètres d'altitude. Au même endroit, un faisceau d'antennes travaillant entre 4 et 10 mégahertz permet de perturber l'ionosphère, tandis que le radar observe les réponses à cette perturbation. Enfin, EISCAT a inauguré en août 1996 une double antenne travaillant à 450 mégahertz sur l'île de Svalbard, en plein dans le cornet polaire, à 79° de latitude nord, l'endroit habité le plus au nord de la planète. Pour ce dernier projet, appelé Eiscat Svalbard Radar (ESR), le Japon a rejoint les six pays fondateurs. Des instruments optiques – des interféromètres – observant en particulier la raie rouge et la raie verte de l'oxygène complètent la panoplie.



Les antennes UHF de 32 mètres de diamètre (à gauche), et VHF en quatre pans de 30 mètres de large (au centre) de Tromsø. A droite, l'antenne ESR mobile de 32 mètres de diamètre à Svalbard observe, tandis que l'antenne fixe de 42 mètres de diamètre était encore en construction, en juillet 1999 (crédit P. Volcke et C. Lathuillère, Laboratoire de Planétologie de Grenoble).

La chaîne internationale de radars à diffusion cohérente SUPERDARN procède d'une technique plus souple et moins dispendieuse. Il s'agit cette fois de pointer des radars Haute Fréquence perpendiculairement au champ magnétique. L'onde rétro-diffusée par les irrégularités ionosphériques donne accès à la vitesse des particules diffusantes par effet Doppler, et au champ électrique selon l'équation de l'annexe 17 :

$$\vec{v} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{B^2}$$

Dans l'hémisphère nord, une configuration de neuf radars couvrant 18 heures locales à haute latitude permet de dresser une carte des champs électriques sur presque toute la calotte polaire c'est-à-dire, en terme de vitesses, une carte de convection ionosphérique. Ces mesures sont directement liées à l'énergie aurorale qui pénètre dans l'atmosphère, crée la dilatation atmosphérique et engendre les problèmes de friction sur les satellites. L'importance de SUPERDARN est accrue par la mise en place de

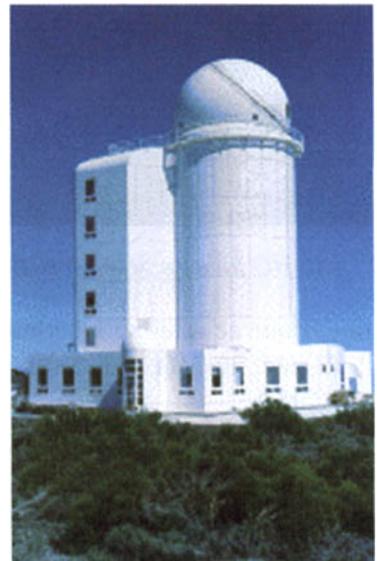
six radars dans l'hémisphère sud à des points magnétiquement conjugués de ceux de l'hémisphère nord. En Europe, la Grande-Bretagne et la France sont les principaux participants de ce programme international.

D'autres instruments au sol permettent de sonder l'ionosphère. Les ionosondes envoient des ondes dans la gamme du mégahertz, qui ricochent dans les basses couches de l'ionosphère, en dessous du pic de la région F (voir chapitre 2), et permettent d'en déduire la concentration électronique. De tels instruments sont relativement peu chers et il semble possible d'en réaliser un réseau planétaire. On en est loin aujourd'hui. Si la plupart des pays européens et américains en disposent, il est très difficile d'exploiter leurs résultats à l'échelle globale : ils ne sont pas étalonnés entre eux, et le rôle de l'expérimentateur est essentiel. Or, dans beaucoup de pays, il est difficile de faire des mesures journalières et de les envoyer à un centre de coordination.

Il en va de même pour les stations de réception GPS au sol (voir chapitre 3). Sur le réseau existant, seulement quatre sont automatisées. Les programmes de dépouillement qui permettent de passer du signal au contenu électronique de l'atmosphère ne sont pas calibrés et il existe les mêmes problèmes que pour les ionosondes.

Pour connaître l'état géomagnétique, des réseaux de magnétomètres ont été mis en place. Ils mesurent en permanence les perturbations magnétiques et indiquent précisément si un orage ou sous-orage magnétique est en cours. A basse latitude, ils donnent un état des lieux des ceintures de radiations (voir chapitre 2) et permettent d'établir les indices magnétiques, si précieux pour les programmes numériques de la météorologie de l'espace. A haute latitude, leurs mesures donnent une signature directe des courants atmosphériques qui affectent certains utilisateurs : compagnies électriques, gazières ou pétrolières... Aujourd'hui, environ 150 observatoires magnétiques opèrent dans le monde, dont 76 sont connectés en réseau (INTERMAGNET). La partie scandinave s'appelle IMAGE.

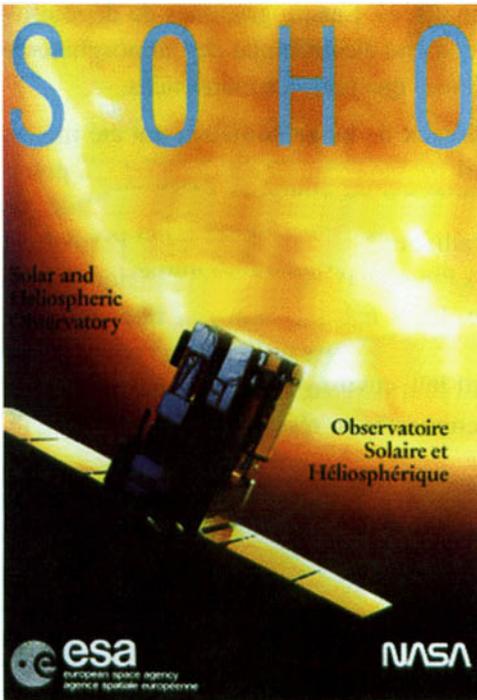
En dépit de la couverture atmosphérique, il est possible d'observer le Soleil depuis le sol. THEMIS, Télescope Héliographique pour l'Etude du Magnétisme et des Instabilités Solaires, est un télescope franco-italiano-espagnol situé sur l'île de Ténériffe. C'est un télescope d'avant-garde qui permet la mesure du champ magnétique dans plusieurs directions, et une haute résolution spatiale, spectrale et temporelle, obtenue par plusieurs modes d'observation complémentaires.



Des antennes radio, comme la grande antenne de Nançay en Sologne, observent la couronne solaire et la région de transition, ce qui permet la détection d'éjections de masses coronales. Des analyses du champ magnétique de tout le disque donnent une idée de la variation globale de l'activité solaire. Des spectrographes, travaillant dans les longueurs d'onde qui pénètrent jusqu'au sol (essentiellement dans le visible), permettent l'analyse permanente de raies d'émission solaires (voir chapitre 1). L'observation dans la gamme radio, en particulier, donne un indicateur précieux de l'activité solaire pour l'estimation du flux extrême ultraviolet à travers la mesure de l'indice $f_{10.7}$.

Les instruments spatiaux

Ici encore sont seulement présentés quelques instruments spatiaux, ceux qui ont le plus contribué aux résultats relatés dans ce livre. Pour l'observation du Soleil, diverses sondes spatiales sont primordiales :



SOHO face au Soleil (crédit ESA)

SOHO : Solar Heliospheric Observatory. Le satellite SOHO est le résultat d'une étroite coopération entre son maître d'œuvre, l'Agence Spatiale Européenne (ESA), et l'Administration Américaine pour l'Aéronautique et l'Espace (NASA). Il a été lancé en décembre 1995. Neuf responsables d'instruments ou Principal Investigators (PI's) sont européens et trois sont américains. Le contrôle de la mission est assuré depuis le centre MEDOC, à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay, et depuis le GSFC dans le Maryland aux Etats-Unis. SOHO a une vision ininterrompue du Soleil grâce à son orbite autour du point de Lagrange L1, à 1,5 millions de kilomètres en avant de la Terre, point où les gravités de la Terre et du Soleil se compensent. On ne compte plus les avancées scienti-

fiques que ce satellite a permis. La physique solaire connaît à présent des époques distinctes : avant et après les apports de la physique nucléaire, puis avant et après ceux de SOHO.

TRACE : petit satellite développé par l'Institut Lockheed à Stanford (USA) pour suivre l'évolution des structures magnétiques du Soleil. Il peut être qualifié de "petit frère de SOHO", par la composition des instruments embarqués et la qualité de ses observations. Cependant moins complet, il observe la couronne solaire et la région

de transition pour tenter de percer le mystère du chauffage de la couronne, et les mécanismes qui précèdent une éruption solaire ou une éjection de masse coronale. Ses images des boucles magnétiques coronales sont d'une résolution inégale.

ULYSSES : ULYSSES, sous maîtrise d'œuvre de l'ESA et en collaboration avec la NASA, est un satellite conçu pour explorer la région de l'espace sous influence du vent solaire, en l'observant sous toutes les latitudes solaires. Ce satellite est opérationnel depuis son lancement, en octobre 1990. Sa trajectoire l'a d'abord conduit vers Jupiter, à 5,4 UA où il est sorti du plan de l'écliptique, et revenu vers le Soleil. Il en a atteint les latitudes les plus élevées en septembre 1994 (un peu plus de 80° de latitude sud solaire), et en juillet 1995 (80° nord). En novembre 1997, il a terminé sa première rotation autour du Soleil, à une distance d'environ 1,3 UA, c'est-à-dire au-delà de l'orbite de la Terre.

YOHKOH : YOHKOH est un satellite qui travaille dans la gamme des rayonnements X et gamma. Lancé en août 1991, il est une réalisation de l'Institut japonais des Sciences Spatiales et Aéronautiques, avec des contributions anglaises et américaines. Le choix de la gamme de rayonnement observée permet l'étude des phénomènes de haute énergie dans les éruptions et dans la couronne solaire. Il a révélé une dynamique à grande échelle de la couronne solaire, et permet une observation précise de l'évolution des trous coronaux.

L'étude du vent solaire s'appuie essentiellement sur le satellite *WIND*. *WIND* a été lancé le 1^{er} novembre 1994 et fut mis en orbite autour du point de Lagrange L1. Il fait partie du projet ISTP (voir annexe 24). L'objectif de ce satellite est d'établir une description complète du vent solaire, à la fois sous son aspect de plasma, de particules énergétiques, et de champ magnétique interplanétaire. Sa position entre la Terre et le Soleil en fait une sorte de sentinelle, capable quelques heures en avance de lancer une alerte d'orage magnétique.

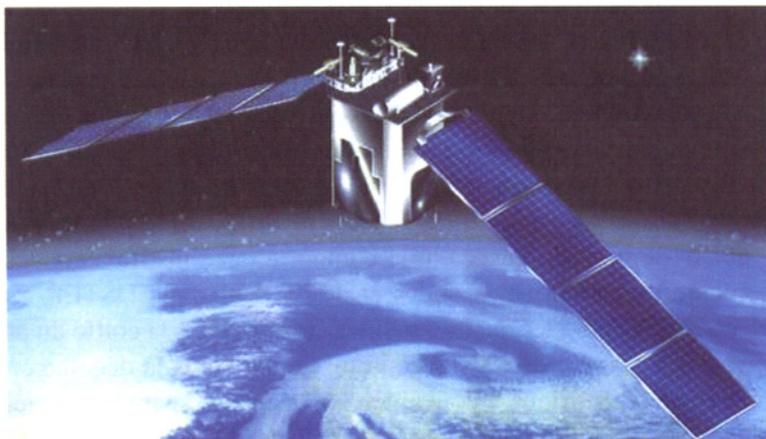
Dans la magnétosphère, le fleuron spatial s'appelle *CLUSTER*. La mission *CLUSTER* comporte quatre satellites instrumentés de manière identique. Placés sur une orbite très aplatie (4 à 19,6 rayons terrestres du périhélie à l'apogée), ils volent en formation aux sommets d'un tétraèdre de dimension ajustable. Chaque satellite pèse 1 200 kilogrammes dont plus de la moitié de la masse est constituée d'ergols utilisés pour la mise à poste et le contrôle du vol en formation. Il se présente sous la forme d'un cylindre de 2,9 mètres de diamètre pour 1,3 mètres de haut. L'alimentation des instruments est fournie par des cellules solaires réparties sur le pourtour du satellite (224 watts en fin de vie). La charge utile comporte onze instruments destinés aux mesures de champ magnétique, d'ondes et de particules. *CLUSTER* a connu un grave accident de parcours : les quatre satellites, arrimés dans la coiffe du premier vol d'essais d'Ariane 5, ont été détruits avec la fusée peu après le décollage. L'importance de la mission scientifique a convaincu les instances spatiales européennes de mettre en œuvre *CLUSTER II*, qui a décollé en 2000. Dès les premiers résultats se sont confirmées les intuitions sur la pertinence de ce vol en formation : nous avons

depuis peu une vision en quatre dimensions de la magnétosphère, radicalement différente de ce que nous imaginions auparavant (voir chapitre 2). CLUSTER est secondé par deux autres engins, GEOTAIL et POLAR.

GEOTAIL correspond à une mission conjointe de l'ISAS japonaise et de la NASA américaine, dévolue à l'étude de la queue magnétosphérique sur une distance s'étendant de 8 rayons terrestres (de son lancement en juillet 1992 à 1995) à environ 200 rayons terrestres (depuis 1995). Une grande partie des concepts expliqués dans le chapitre 2 sur cette partie de la magnétosphère ont été confirmés ou établis grâce à ce satellite.

POLAR, autre élément des outils ISTEP, a été lancé en février 1996. Son rôle est d'obtenir des données sur les transferts d'énergie entre le vent solaire et la magnétosphère à travers les cornets polaires, et la façon dont cette énergie se transforme dans l'ionosphère aurorale (aurores, création de champs électriques...). Lorsqu'il passe à basse latitude, *POLAR* mesure les ceintures de radiations. Les images actuelles les plus spectaculaires de l'ovale auroral sont obtenues par ce satellite, en particulier dans la gamme de l'ultraviolet et à cinq fréquences dans le visible. Il possède une orbite très elliptique, avec une apogée à 9 rayons terrestres, un périégée à 1,8 rayons terrestres et une inclinaison de 86 degrés.

A l'heure actuelle, il existe peu d'observations thermosphériques par satellite. La sonde américaine *TIMED* devrait prochainement combler ce manque. Avec ce satellite, la NASA espère établir les premières évidences de couplage entre les phénomènes thermosphériques et climatiques, en particulier dans le contexte du réchauffement global de la planète. *TIMED* est l'acronyme de Thermosphère-Ionosphère-Mésosphère-Energie-Dynamique. Depuis son altitude de 625 kilomètres, son domaine d'observation s'étendra de 60 à 180 kilomètres d'altitude au-dessus du sol, région particulièrement importante, puisqu'elle concerne les télécommunications, le suivi de satellites, les frictions sur les satellites et la rentrée des véhicules spatiaux.



Le satellite TIMED, dont le lancement est prévu fin 2001 (crédit NASA)

Météorologie de l'espace ?

Les instruments que nous avons décrits sont essentiellement à vocation scientifique. Ils permettent d'élargir les connaissances, la compréhension du système Soleil-Terre. Ils ne suffisent pas à établir un service opérationnel de météorologie de l'espace. Pour cela, tant au sol que dans l'espace, il serait nécessaire de posséder une surveillance permanente (côté jour comme côté nuit de la Terre) et globale. Cela impliquerait donc des ensembles multi-satellites et des instruments au sol répartis selon une grille suffisamment dense, et soigneusement étalonnés entre eux.

Sites sur le web

<http://superdarn.jhuapl.edu>

<http://www.irfl.lu.se/HeliosHome/magnetometers.html>

<http://obsmag.ipgp.jussieu.fr/INTERMAGNET/index.html>

<http://www.themis.iac.es/>

<http://sohowww.estec.esa.nl/>

<http://helio.estec.esa.nl/ulysses/>

<http://www.solar.isas.ac.jp/english/index.html>

<http://lep694.gsfc.nasa.gov/waves/waves.html>

Annexe 24

ORGANISER LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Les pays industrialisés sont les plus concernés par l'essor de la météorologie de l'espace mais, à l'heure actuelle, nul ne peut prévoir quelle place elle prendra dans le futur. S'il est certain qu'elle permettrait des économies substantielles, il est difficile de chiffrer quels coûts supplémentaires elle engendrerait, et totalement impossible d'imaginer quels bénéfices en seraient tirés pour la connaissance de l'environnement terrestre. Les grandes nations spatiales s'engagent donc avec précaution dans cette aventure. Les choix diffèrent d'un pays à l'autre, même s'il existe une intense collaboration internationale.

Aux Etats-Unis, l'option retenue a été la concentration de la majeure partie des moyens de prévision en un lieu : le Space Environment Center (SEC) qui se trouve à Boulder, dans le Colorado. Il emploie plus de 70 personnes et reste ouvert 24 heures par jour, 7 jours par semaine. Tous les services sont gratuits et distribués via Internet, qu'il s'agisse d'alerte, d'analyse de données, de mise en commun des mesures de divers instruments, au sol comme dans l'espace.

Le SEC a été mis sur pied sous l'égide du centre national américain sur les océans et l'atmosphère (NOAA), l'office de la recherche océanique et atmosphérique (OAR), et le centre national pour la prédiction environnementale (NCEP). Cette triple paternité implique une vision de la météorologie de l'espace en tant que service public, puisqu'aucun industriel n'en fait formellement partie. Néanmoins, le centre opérationnel de météorologie de l'espace du SEC est dirigé conjointement par la NOAA et l'US Air Force. Cette dernière possède d'ailleurs son propre escadron, le 55^e, dont la mission est la maîtrise de la météorologie de l'espace.

L'Europe a misé sur sa diversité et sur les réseaux modernes d'interconnexion. La Tchèque, l'Allemagne, l'Italie, la Russie ont mis quelques moyens dans la balance. L'effort de la Finlande, du Danemark, de la Norvège, de la Hollande et de la Suède ne doit pas surprendre : situés à haute latitude, ils sont plus soumis que les autres aux intempéries spatiales. Enfin, l'Angleterre et la France, à longue tradition d'astronomie, ont investi des moyens humains et financiers importants au regard de leurs tailles. Ces pays hésitent encore à se doter de structures centrales de météorologie de

l'espace. Chacun d'entre eux souhaite conserver son autonomie, mais tous savent qu'il faut échanger les savoir-faire et les données. Peu à peu émerge l'idée d'un centre de coordination de la météorologie de l'espace, dont la structure pratique, les tutelles et l'emplacement restent à déterminer. Sur ce dernier point, la Grande-Bretagne et la Hollande sont très avancées. Enfin, l'Australie et le Japon, isolés géographiquement mais pays riches, collaborent avec l'Europe aussi bien qu'avec les Etats-Unis.

Comme les phénomènes de la météorologie de l'espace sont par essence planétaires, des liens se sont tissés à travers le International Space Environment Service (ISES), sous l'auspice de l'Union des Radio-Sciences Internationales (URSI), société savante créée en France et qui a conservé son nom français malgré son internationalisation. Des laboratoires de Chine, USA (également à Boulder), Russie, France, Inde, Canada, Tchéquie, Japon, Australie et Pologne ont réuni leurs efforts pour une surveillance commune et permanente du Soleil, et la diffusion simultanée des bulletins d'alerte. La structure de l'ISES est souple, puisque les centres régionaux gardent leur autonomie. Ses utilisateurs actuels sont, comme on peut s'y attendre, les personnels des radiocommunications HF, les compagnies aériennes, spatiales et d'électricité. L'ISES détermine chaque année un certain nombre de "jours mondiaux", au cours desquels tous les instruments géophysiques de la planète sont requis pour observer au service du plus grand nombre : les données acquises sont partagées par tous.

Sans cette collaboration, il n'aurait pas été possible de mettre en place les observations d'évènements depuis les éjections de masse coronale jusqu'aux perturbations des systèmes terrestres. C'est heureusement ce qui a été rendu possible sous l'égide de l'ISTP (International Solar Terrestrial Physics). Il s'agit d'un programme créé en 1980 conjointement par trois grandes agences spatiales, la NASA, l'ESA et l'ISAS, agence spatiale japonaise. Les objectifs de l'ISTP sont avant tout scientifiques : déterminer la structure et la dynamique de l'intérieur du Soleil, comprendre l'activité solaire, le chauffage de la couronne, l'accélération du vent solaire, le milieu interplanétaire, l'impact sur l'atmosphère terrestre et la magnétosphère... A terme, les scientifiques qui collaborent dans cette structure souhaitent mettre au point un modèle global des relations Soleil-Terre. Pour cela, ils disposent d'instruments spatiaux et d'instruments au sol. Les plus importants satellites sont GEOTAIL, WIND, POLAR, SOHO et CLUSTER ; les principaux instruments au sol sont les radars SUPERDARN et EISCAT, ainsi que les réseaux de magnétomètres (voir annexe 23). Selon leur coût, ces instruments sont financés par des agences nationales (en France, le CNRS, le CNES...) ou internationales (ESA, ...).

```

:Product: Report of Solar-Geophysical Activity
:Issued: 2000 Feb 16 2210 UT
# Prepared jointly by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA,
#Space Environment Center and the U.S. Air Force.
#
JOINT USAF/NOAA REPORT OF SOLAR AND GEOPHYSICAL ACTIVITY
SDF NUMBER 047 ISSUED AT 2200Z ON 16 FEB 2000
IA. ANALYSIS OF SOLAR ACTIVE REGIONS AND ACTIVITY FROM 15/2100Z
TO 16/2100Z: SOLAR ACTIVITY WAS LOW. ONLY INFREQUENT C-CLASS EVENTS
OCCURRED DURING THE PERIOD WITH THE LARGEST EVENT BEING A C2/SF FROM
REGION 8867 AT 16/2023UT.THE DISK HAS ELEVEN SPOTTED REGIONS,
INCLUDING TWO NEW GROUPS: REGION 8877 (S26E28) AND REGION 8878
(S27W42). ALL REGIONS ARE MAGNETICALLY SIMPLE.
IB. SOLAR ACTIVITY FORECAST: SOLAR ACTIVITY IS EXPECTED TO CONTINUE
TO BE LOW.
IIA. GEOPHYSICAL ACTIVITY SUMMARY FROM 15/2100Z TO 16/2100Z:
THE GEOMAGNETIC FIELD WAS QUIET TO UNSETTLED.
IIB. GEOPHYSICAL ACTIVITY FORECAST: THE GEOMAGNETIC FIELD IS
EXPECTED TO BE QUIET TO UNSETTLED.
III. EVENT PROBABILITIES 17 FEB-19 FEB
CLASS M 10/10/10
CLASS X 01/01/01
PROTON 01/01/01
PCAF GREEN
IV. PENTICTON 10.7 CM FLUX
OBSERVED 16 FEB 160
PREDICTED 17 FEB-19 FEB 160/155/150
90 DAY MEAN 16 FEB 167
V. GEOMAGNETIC A INDICES
OBSERVED AFR/AP 15 FEB 011/011
ESTIMATED AFR/AP 16 FEB 008/008
PREDICTED AFR/AP 17 FEB-19 FEB 008/008-008/008-008/008
VI. GEOMAGNETIC ACTIVITY PROBABILITIES 17 FEB-19 FEB
A. MIDDLE LATITUDES
ACTIVE 20/20/20
MINOR STORM 05/05/05
MAJOR-SEVERE STORM 01/01/01
B. HIGH LATITUDES
ACTIVE 30/30/30
MINOR STORM 10/10/10
MAJOR-SEVERE STORM 01/01/01

```

*Le bulletin de météorologie spatiale du SEC à la NOAA de Boulder (USA),
le 16 février 2000*

QUELQUES CONSTANTES UTILES

1. Constantes physiques

Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Constante de la gravitation	$G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
Constante de Planck	$h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Constante de Boltzmann	$k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Masse de l'électron au repos	$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton au repos	$m_p = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Charge élémentaire	$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Perméabilité du vide	$\mu_0 = 12,566 \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$
Permittivité du vide	$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
Constante de Stefan	$\sigma = 5,67 \times 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

2. Constantes géophysiques

Rayon moyen de la Terre	$6,371 \times 10^6 \text{ m}$
Rayon équatorial du Soleil	$696 \times 10^6 \text{ m}$
Distance moyenne Terre-Soleil (UA)	$1,496 \times 10^{11} \text{ m}$
Constante solaire	1366,1 W

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES DE SITES SUR LA TOILE

Chapitre 1 – Le Soleil

<http://sunbase.crl.go.jp/>

<http://bass2000.bagn.obs-mip.fr/> est un lien qui ouvre de nombreux sites, en particulier en français, en démarrant de la base de données solaires de Bagnères de Bigorre.

<http://www.nasa.gov/>

<http://sohowww.estec.esa.nl/> est le site européen de SOHO.

<http://www.space.lockheed.com/SXT/homepage.html> est un site américain sur le merveilleux satellite d'observation du Soleil, YOHKOH.

<http://www.solar.isas.ac.jp/english> (site japonais)

<http://mesola.obspm.fr> est le site "Soleil entier" de Bass 2000 (site français de Meudon).

Chapitre 2 – La Terre

<http://cieletespace.fr> est le site intéressant d'un journal d'astronomie.

<http://www.eiscat.uit.no> est le site du radar EISCAT qui, intéressant par lui-même, est également une excellente porte d'entrée vers de nombreux sites de relations Soleil-Terre.

Sur la toile, on peut facilement trouver de splendides photographies ou animations d'aurores. On y trouve également des descriptifs et une nomenclature qui sortent du cadre de cet ouvrage. Quelques bonnes adresses :

<http://beatles.imv.uit.no/english/science/publicat/waynorth/wn1/contents.htm>

<http://snake.irf.se/>

<http://space.sgo.fi/htmls/jpics.html>

<http://www.ucalgary.ca/~tstronds/satellites/html/isis.html>

<http://ispec.ucsd.edu/virtual/>

<http://home.sn.no/~kjellr/photo.html>

<http://nis-www.lanl.gov/~mgh/>

<http://www.geo.mtu.edu/weather/aurora/images/aurora/>

<http://www.geo.mtu.edu/weather/aurora/images/aurora/jan.curtis/>

<http://www-spod.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html> est un site de la NASA faisant (en anglais) un intéressant historique de la physique de la magnétosphère.

Chapitre 3 – La météorologie de l'espace

<http://www.esoc.esa.de> est le site de l'ESOC.

<http://www.rcru.rl.ac.uk/iono/> donne les cartes de prévisions ionosphériques.

<http://www.arianespace.com> est le site d'Arianespace.

<http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/> est le site de GOES.

<http://www.photovault.com/Link/Industry/ProcessOil/AlaskaPipeline.html>

Les sites web de météorologie spatiale :

Australie : <http://www.ips.gov.au>

Etats-Unis : <http://www.windows.umich.edu/spaceweather/>
<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html>

Russie : <http://www.izmiran.rssi.ru> ; <http://www.iki.rssi.ru>
<http://alpha.npi.msu.ru/RSWI/rswi.html>

Suède : <http://www.astro.lu.se/~henrik/helios.html>
<http://www.astro.lu.se/>

Grande-Bretagne : <http://www.rcru.rl.ac.uk/iono/maps.html>
<http://www.cclrc.ac.uk/Rutherford/>

France : <http://bass2000.bagn.obs-mip.fr/>
<http://www.dasop.obspm.fr/previ/>

Japon : <http://www.isas.ac.jp/index-j3.html>

ISES : <http://www.sel.noaa.gov/ises/ises.html>

ESA : <http://www.esrin.esa.it/>

NASA : <http://www.nasa.gov/>

ISTP : <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/>

RÉFÉRENCES D'OUVRAGES POUR APPROFONDIR

Chapitre 1 – Le Soleil

Les Etoiles, C. ZANANIRI, Editions Ellipse, 2000 (ISBN 2-7298-0031-X) est un livre sur la formation des étoiles.

Principes fondamentaux de structure stellaire, M. FORESTINI, Gordon and Breach Science Pub., 1999 (ISBN 90-5699-223-6) est un livre de niveau maîtrise de physique faisant le tour des connaissances en physique stellaire.

L'Astrophysique nucléaire, J. AUDOUZE, PUF, coll. Que sais-je ?

Evolution stellaire et nucléosynthèse, H. REEVES, Gordon and Breach.

“L'ère SOHO a commencé”, F. BAUDIN et S. KOUTCHMY, *Journal des astronomes français*, 53, 10-17, 1997 est un article exprimant sans ambiguïté la qualité des apports de SOHO dans la physique solaire.

Le Soleil et ses relations avec la Terre, K.R. LANG, Editions Springer, 1995 (ISBN 3-540-59445-0) est un livre magnifiquement illustré, dont le Soleil est le sujet principal, traité de façon assez exhaustive.

Le Soleil en face, P. LANTOS, Editions Masson, 1997 (ISBN 2-225-83054-1) est un petit livre scientifique (niveau DEUG de physique), écrit par l'un des maîtres du domaine en France. Il est complet mais hélas en noir et blanc.

Chapitre 2 – La Terre

Sciences de la Terre et de l'univers, A. BRAHIC, M. HOFFERT, A. SCHAAF et M. TARDY, sous la direction de J.Y. DANIEL, Editions Vuibert, 1999 (ISBN 2-7117-5280-1) est certainement l'une des références de géophysique en langue française.

La Physique et la Terre, H.C. NATAF et J. SOMMERIA, Belin-CNRS Editions, 2000, (ISBN 2-7011-2370-4) présente la Terre.

Géophysique et Géologie, L. LLYBOUTRY, Editions Masson, coll. Enseignement des sciences de la Terre, 1998 (ISBN 2-225-82922-5) présente la Terre et son champ magnétique.

Aéronomie, physique et chimie de l'atmosphère, G. KOCKARTS, Editions De Boeck Université, 2000 (ISBN 2-8041-3456-3) est un livre écrit par l'un des fondateurs de cette science, avec une très grande clarté.

Du Soleil à la Terre, J. LILENSTEN et P.L. BLELLY, Editions Diffusion Presses Sciences (EDP Sciences), coll. Grenoble Sciences, 2000 (ISBN 2-86883-467-1) est un livre de niveau maîtrise de physique.

Le Système solaire, T. ENCRENAZ, J.P. BIBRING et M. BLANC, Interédition/Editions du CNRS, 1987 (ISBN 2-7296-0152-X) est un ouvrage de planétologie qui explore les aspects magnétique et ionosphérique. Une réédition corrigée serait en cours...

Les Aurores boréales ou les lumières mystérieuses, C. SAVAGE, Editions du Trécarré, 1994 (ISBN 2-89249-535-0) est un livre grand public, en langue française, sur les aurores polaires. La science y est maltraitée, mais on y trouvera de nombreuses croyances et légendes autour des aurores, et une relation passionnante des efforts scientifiques pour les comprendre, de l'Antiquité aux années 1950.

Aurores boréales et australes, M. FEHRENBACH, G. DAWIDOWICZ et R. MARION, GNGL – Pôle d'images, 2001 (ISBN 2-9516-1000-9) est un livre merveilleusement illustré, traitant avec un égal bonheur la science des aurores, les récits d'explorateurs et l'histoire des sciences.

Chapitre 3 – La météorologie de l'espace

Il existe très peu de littérature en langue française à ce jour. On peut se procurer le “rapport final du groupe d'évaluation des besoins” du CNES (document CNES/DP/CM, n° 98-252).

Histoire solaire et climatique, E. NESME-RIBES et G. THULLER, Belin, 2000 est un livre qui montre bien les liens entre le Soleil et le climat, et les inconnues actuelles.

L'Environnement spatial, J.C. BOUDENOT, PUF, coll. Que sais-je, 1995 (ISBN 2-1304-7271-0) est un petit livre précurseur, en quelque sorte, de la météorologie de l'espace.

GLOSSAIRE DES MOTS

Aéronomie : domaine de l'astronomie concernant l'étude spécifique des moyennes et hautes atmosphères planétaires.

Albédo : fraction de la lumière et de l'énergie reçue que réfléchit ou diffuse un corps non lumineux. L'albédo est toujours compris entre 0 et 1. Il varie suivant la longueur d'onde. Un albédo nul à une longueur d'onde donnée caractérise un corps qui absorbe parfaitement tout ce rayonnement. Une valeur de 1 caractérise un miroir parfait pour cette longueur d'onde.

Anneau de courant : zone de la magnétosphère au-dessus d'une altitude de quatre rayons terrestres, dans laquelle circulent ions et électrons sous l'effet conjugué du champ de gravité et du champ géomagnétique.

Aphélie : point le plus éloigné de l'orbite d'un corps gravitant autour du Soleil.

Apogée : point le plus éloigné de l'orbite d'un corps gravitant autour de la Terre.

Astéroïde : planète de faible dimension, moins de quelques centaines de kilomètres. Entre Mars et Jupiter s'étend une ceinture de plusieurs milliers d'astéroïdes, à une distance moyenne du Soleil comprise entre 2,17 et 3,3 UA.

Aurore polaire : phénomène atmosphérique lumineux dû à la désexcitation du gaz atmosphérique, excité à la suite de collisions avec des particules issues du vent solaire (boréale dans l'hémisphère nord, australe dans l'hémisphère sud).

Basse (orbite) : orbite satellitaire autour de 1 000 kilomètres d'altitude de la Terre.

Big-bang : selon le modèle cosmologique "standard", explosion simultanée dans tout l'espace qui a présidé à notre univers actuel.

Ceinture de Kuiper : second réservoir de comètes et de petits corps du système solaire, qui a la forme d'un anneau plat s'étendant des orbites de Neptune et Pluton jusqu'à la frontière interne du nuage de Oort. Elle pourrait contenir dix fois plus de noyaux cométaires que le nuage de Oort.

Ceintures (de radiation) de Van Allen : zones de la magnétosphère entourant la Terre, dans lesquelles sont piégées des particules de haute énergie.

Cercle polaire : latitude au-delà de laquelle le Soleil reste couché au moins un jour par an (ou ne se couche pas au moins un jour par an).

Champ géomagnétique : champ magnétique de la Terre.

Champ magnétique interplanétaire : champ magnétique porté par le vent solaire.

Chromosphère : région d'une atmosphère stellaire, et en particulier solaire, au-dessus de la photosphère et en dessous de la couronne, caractérisée par une augmentation brutale de la température. Elle est nommée ainsi parce qu'elle apparaît lors d'éclipses totales du Soleil comme une mince couche rose vif. Cette couleur est due principalement à l'émission de l'hydrogène à 656,3 nanomètres. Son épaisseur sur le Soleil est de l'ordre de 10 000 kilomètres.

Circulaire (orbite) : orbite satellitaire dont l'excentricité est proche de zéro.

Cœur nucléaire : centre d'une étoile où se déroulent les réactions de fusion nucléaire qui fournissent l'énergie rayonnée par l'étoile.

Comète : astre du système solaire composé d'un noyau solide, mélange de roche et de glace. Il existe deux réservoirs de comètes, le nuage de Oort et la ceinture de Kuiper. En se rapprochant du Soleil, les comètes éjectent une atmosphère ayant l'aspect d'une chevelure qui s'étire en deux queues, neutre et ionisée.

Constante solaire : puissance solaire totale reçue par une surface de 1 mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire, à une distance de 1 UA (1366,1 Watts par mètre carré).

Convection : transfert d'énergie thermique par des courants de fluides (gaz ou liquides).

Cornet polaire : zone de la magnétosphère dans laquelle les lignes de champ géomagnétique sont ouvertes sur la magnétogaine et sur l'espace.

Coronographe : instrument optique simulant une éclipse.

Corotation : rotation conjointe de l'atmosphère et d'une planète.

Courant aligné : courant électrique aligné le long de lignes de champ magnétique. Dans l'ionosphère, on les trouve à haute latitude, dans l'ovale auroral.

Courant annulaire : courant électrique créant un anneau à basse latitude autour de la Terre, à une distance de quatre à sept rayons terrestres de la surface de la planète.

Courant de magnétopause : courant créé par la séparation des charges du vent solaire sur la magnétopause.

Courant de traversée de queue : courant électrique créé par les séparations de charges dans la queue de la magnétosphère (côté nocturne de la Terre).

Couronne solaire : région de haute température de l'atmosphère solaire, au-dessus de la chromosphère, contenant un plasma piégé par le champ magnétique local, ou s'évadant vers l'espace si les lignes de champ magnétique sont ouvertes.

Cycle de Schwabe : cycle de l'activité solaire, compris entre 10 et 12 ans.

Déclinaison : arc d'un méridien entre un point de la surface et le point à l'équateur.

Déclinaison magnétique : angle entre le méridien magnétique et le méridien géographique en un point.

Défilant : satellite non géostationnaire.

Ecliptique : plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil.

Ejection de masse coronale : éjection brutale de masse du Soleil au sens le plus large.

Elliptique (orbite) : orbite satellitaire dont l'excentricité est faible.

Equatoriale (orbite) : orbite satellitaire dont l'inclinaison est proche de 0° ; si quasi équatoriale (orbite) : orbite satellitaire dont l'inclinaison est inférieure à 10° .

Ergol : carburant ou combustible entrant dans la composition d'un propergol.

Eruption solaire : éjection de masse du Soleil, liée à une protubérance.

Etoile : astre gazeux lumineux au sein duquel se produisent ou se sont produites des réactions de fusion nucléaire.

Excentricité : paramètre d'une ellipse qui caractérise son aplatissement. L'excentricité vaut 1 dans le cas d'une droite et 0 dans celui d'un cercle.

Exosphère : zone supérieure de l'hétérosphère dans laquelle la température est constante.

Facule : région ou tache plus brillante que le reste de la surface solaire.

"Farfadair" : éclair rouge couplant la basse atmosphère et l'ionosphère terrestre.

Feuillet neutre (ou feuillet de plasma) : zone de la magnétopause, côté nuit, où se retrouvent ions et électrons du vent solaire.

Fibrille : structure sombre et allongée de la couronne solaire, délimitant probablement le champ magnétique chromosphérique.

Filament : longue structure qui apparaît près de lignes d'inversion du champ magnétique sur le Soleil. Vu contre la surface brillante du Soleil, un filament apparaît plus sombre, parce que plus froid. Vu sur le côté du Soleil, lorsqu'il traverse l'atmosphère solaire peu brillante, il apparaît brillant (voir protubérance).

Four nucléaire : centre du Soleil, au sein duquel une fusion nucléaire entretient une génération d'énergie (voir cœur nucléaire).

Galaxie : ensemble d'étoiles, de poussières et de gaz interstellaire isolé dans l'espace, et dont la cohésion est assurée par la gravitation.

Géante rouge : étoile dont la combustion de l'hydrogène du cœur nucléaire est terminée ; le cœur d'hélium est devenu plus dense et plus chaud qu'à l'origine, et l'enveloppe est dilatée (jusqu'à une centaine de fois sa taille initiale).

Géostationnaire (orbite) : orbite satellitaire survolant toujours le même point de l'équateur terrestre. Les satellites géostationnaires sont en orbite dite "haute", à 36 000 kilomètres.

Géosynchrone : satellite dont le mouvement autour de la Terre se fait avec la même pulsation que le mouvement de la Terre autour de son axe.

Granulation : structure brillante de la photosphère solaire, vue comme une cellule de 1 200 kilomètres de diamètre en moyenne et d'une durée de vie moyenne de

18 minutes. Entre les granulations, la matière paraît plus sombre. Ces granules correspondent au bouillonnement de la zone convective.

Haute (orbite) : voir géostationnaire.

Héliosphère : région de l'espace soumise au vent solaire. Elle s'étend jusqu'à environ 50 à 100 UA du Soleil.

Héliosynchrone : satellite en orbite basse dont le passage à un nœud se fait toujours à la même heure solaire.

Hétérosphère : zone de l'atmosphère typiquement située au-dessus de 80 kilomètres, dans laquelle les constituants ont chacun leur propre hauteur d'échelle. Chacun d'eux subit en effet sa propre loi de décroissance de la pression.

Heure légale : heure définit par chaque pays.

Heure locale : voir TL.

Homopause : frontière supérieure de l'homosphère, vers 80 kilomètres d'altitude.

Homosphère : ensemble des basses couches de l'atmosphère terrestre dans lesquelles la hauteur d'échelle est la même pour tous les constituants : la décroissance de la pression et de la concentration suit la même loi pour tous. L'homosphère s'arrête vers 80 kilomètres d'altitude.

Inclinaison : angle entre le plan dans lequel orbite un corps et le plan équatorial.

Ionosphère : gaz de particules chargées (ions et électrons), mélangé à la thermosphère pour former l'atmosphère des hautes altitudes.

Jansky : voir unité de flux solaire.

Jet bleu : éclair bleu couplant la basse atmosphère et l'ionosphère terrestre.

Jet coronal : éjection de gaz solaire depuis la couronne.

L1 halo ou L1 Lissajous : orbite satellitaire autour du point de Lagrange L1.

L1LO : L1 Lissajous Orbit, voir L1 halo.

Latitude : Distance angulaire à l'équateur dans un système de coordonnées sphériques.

Limbe : Bord lumineux du disque d'un astre.

Longitude : distance angulaire le long d'un parallèle, comptée à partir d'un méridien origine dans un système de coordonnées sphériques.

Macrospicule : matière solaire expulsée en permanence entre les supergranules, sous forme de langues de protons et d'électrons.

Magnétogaine : zone de compression du vent solaire sur le champ magnétique terrestre.

Magnétopause : zone frontière entre la magnétosphère et le vent solaire.

Magnétosphère : cavité à l'intérieur de laquelle le plasma est soumis au champ géomagnétique, et relativement protégé du vent solaire.

Méridien : lieu des points ayant même longitude à la surface de la Terre ou de tout autre astre.

Mésopause : frontière entre la mésosphère et la thermosphère.

Mésosphère : région de l'atmosphère située entre 50 et 80 kilomètres d'altitude environ.

Météore : fragment de roche voyageant dans l'espace qui pénètre dans l'atmosphère terrestre. En s'y échauffant, il provoque le phénomène d'étoile filante.

Météorite : fragments de météores que l'on retrouve au sol.

Micro-onde : voir SHF.

Minimum de Maunder : période pendant laquelle presque aucune tache solaire n'a été observée (de 1645 à 1715).

Miroir magnétique : phénomène qui transfère de l'énergie liée aux mouvements parallèles aux lignes de champ en énergie liée à des mouvements perpendiculaires, conduisant les particules à ralentir, s'arrêter et rebrousser chemin lorsqu'elles s'enfoncent dans des zones où les lignes de champ se resserrent.

Molnya : orbite satellitaire décrivant une ellipse très aplatie (un périhélie de 400 kilomètres et une apogée de 40 000 kilomètres environ).

Moyenne (orbite) : orbite satellitaire autour de 20 000 kilomètres d'altitude de la Terre.

Naine blanche : phase d'une étoile de type solaire succédant à celle de géante rouge. La température de surface d'une naine blanche est de l'ordre de 10 000 kelvins et sa luminosité est très faible. La masse volumique moyenne y est de l'ordre de la tonne par centimètre cube.

Naine brune : étoile de masse trop faible pour être le siège de réactions nucléaires.

Nébuleuse d'Andromède : galaxie de notre amas local similaire à la nôtre (la Voie lactée).

Nébuleuse planétaire : nuage de gaz en expansion autour du résidu d'une naine blanche.

Neutrino : particule élémentaire de charge électrique nulle, de masse très faible.

Nuage de Oort : l'un des réservoirs de comètes, aux confins du système solaire – entre 20 000 et 50 000 UA¹ –. Il s'agit d'une sphère ténue dont l'existence a été postulée dans les années 1950. On estime que le nombre de noyaux de comètes qui seraient contenus dans ce nuage serait situé entre 100 et 1 000 milliards.

Nuage magnétique : front d'une éjection de masse coronale, une fois dans l'espace.

Nucléosynthèse : formation des éléments chimiques par réactions nucléaires au sein des étoiles, ou dans les premiers instants après le big-bang.

1 Cette distance représente un peu moins de la distance qui sépare le Soleil de l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure.

Onde de choc : dans le cadre de l'aéronomie, désigne parfois le côté solaire de la magnétogaine.

Orage magnétique : perturbation importante du champ géomagnétique due à son interaction avec le champ magnétique interplanétaire. Orage : l'effet est planétaire. Sous-orage : il est localisé aux hautes latitudes.

Ovale auroral : zone de précipitation des particules ionisées depuis la magnétosphère vers la thermosphère. Il y a un ovale au sud et un au nord, de façon permanente. Il va généralement de 65° à 75° de latitude, mais peut s'étendre lors d'orages ou de sous-orages magnétiques.

Ozone : molécule formée de trois atomes d'oxygène.

Parallèle : lieu des points ayant même latitude à la surface de la Terre ou de tout autre astre.

Périgée : point le plus proche de l'orbite d'un corps gravitant autour de la Terre.

Périhélie : point le plus proche de l'orbite d'un corps gravitant autour du Soleil.

Photon : corpuscule élémentaire d'énergie électromagnétique de mouvement.

Photosphère : surface visible du Soleil en lumière blanche. La majeure partie du rayonnement solaire vient de la photosphère, une partie minime étant issue de la couronne.

Plage chromosphérique : zone de la chromosphère dans laquelle les lignes de champ d'une tache favorisent la dissipation d'énergie vers l'atmosphère immédiate, et donnent naissance à des zones atmosphériques chaudes qui peuvent se prolonger jusque dans la couronne solaire.

Planète géante : désigne Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Planète tellurique : désigne les planètes du système solaire, de composition et de taille proches de celles de la Terre : Mercure, Vénus et Mars.

Plasma : gaz au sein duquel des particules chargées (ions, électrons) sont libres. Dans les plasmas géophysiques, il y a neutralité des charges, c'est-à-dire globalement autant d'électrons que d'ions monovalents.

Plasmapause : frontière externe de la plasmasphère.

Plasmasphère : zone de la magnétosphère en corotation avec la Terre.

Plume : jets de matière du Soleil au-dessus des trous coronaux.

Point de Lagrange : zone de l'espace où les gravités de deux corps se compensent. On considère ici le point L1 qui se trouve entre les deux astres.

Point de reconnexion : zone de la magnétosphère, côté nuit, où le feuillet de plasma rejoint la magnétopause.

Point subsolaire : lieu de la magnétosphère situé sur la droite imaginaire reliant le centre du Soleil et le centre de la Terre.

Polaire (orbite) : orbite satellitaire dont l'inclinaison est 90° .

Pôle géographique : intersection de l'axe de rotation de tout astre avec la surface de cet astre.

Pôle magnétique : région d'un astre où l'inclinaison magnétique est maximale.

Positron : antiparticule de l'électron, de charge positive.

Pression cinétique : pression exercée par un gaz.

Pression magnétique : pression exercée par les forces magnétiques.

Propergol : produit composé d'un ou de plusieurs ergols capable, par réaction chimique, de fournir de l'énergie pour la propulsion d'un moteur de fusée.

Protubérance de région active : jets de matière solaire pouvant atteindre une altitude de 10 000 kilomètres. Le champ magnétique dans une protubérance peut atteindre la cinquantaine de Gauss (5×10^{-3} T) (voir filament).

Protubérance quiescente : protubérance de soleil calme, pouvant atteindre une altitude de 100 000 kilomètres et un champ magnétique de l'ordre de la dizaine de Gauss (10^{-3} T).

Quasipolaire (orbite) : orbite satellitaire dont l'inclinaison est comprise entre 80° et 100° .

Rayon cosmique : particule de haute énergie issue d'autres étoiles que le Soleil.

Région de transition : basse couronne solaire caractérisée par une augmentation brutale de la température (de quelques milliers à quelques millions de degrés).

Rotation sidérale : rotation du Soleil (ou d'un astre) vue depuis un point fixe dans le système solaire.

Rotation synodique : rotation du Soleil vue depuis la Terre, c'est-à-dire prenant en compte la rotation propre de la Terre (sur elle-même et autour du Soleil).

Spicule : matière solaire expulsée en permanence entre les granules, sous forme de langues de protons et d'électrons.

Spirale d'Archimède : figure géométrique dont l'exemple est la trajectoire dessinée par l'eau éjectée d'un dispositif d'arrosage rotatif de jardin.

Stratopause : frontière supérieure de la stratosphère.

Stratosphère : région de l'atmosphère entre la troposphère et la mésosphère, de 12 kilomètres à 50 kilomètres d'altitude environ.

Submillimétrique : onde radio dont la fréquence est comprise entre 300 gigahertz et 1 térahertz.

Supergranulation : granulation de grande taille (30 000 kilomètres).

Supernova : stade de la vie d'une étoile massive, qui se manifeste par son explosion la faisant devenir momentanément très lumineuse.

Tache solaire : zone sombre de la photosphère, d'un diamètre moyen de l'ordre de quelques milliers de kilomètres. Les taches sont des lieux de fort champ magnétique, qui sont sombres parce qu'elles sont plus froides que la photosphère.

Température exosphérique : température de la thermosphère au-dessus de 400 kilomètres d'altitude.

Temps local : voir TL.

Temps Universel : voir TU.

Thermosphère : zone de croissance de température de l'atmosphère neutre terrestre, au-dessus d'environ 80 kilomètres d'altitude.

Troposphère : région de l'atmosphère la plus voisine du sol, dont l'épaisseur augmente du pôle (8 kilomètres) vers l'équateur (17 kilomètres).

Trou coronal : région de la couronne où les lignes de champ magnétique sont ouvertes sur l'espace, et de laquelle s'échappe le vent solaire rapide.

Tundra : orbite d'un satellite géosynchrone non géostationnaire.

Unité Astronomique : distance moyenne entre le Soleil et la Terre, c'est-à-dire 1 495 978 710 mètres.

Unité de flux solaire : unité utilisée pour la mesure du flux solaire, en particulier pour l'indice $f_{10.7}$ (en $10^{22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$).

Vent solaire : flux de particules composé principalement d'électrons et de protons (expulsés en permanence depuis le Soleil vers l'espace), lié au champ magnétique interplanétaire.

Vent solaire lent : vent solaire éjecté au-dessus de la photosphère calme (vitesses de l'ordre de 300 à 450 km s^{-1}).

Vent solaire rapide : vent solaire éjecté au-dessus des trous coronaux, ou lors de phénomènes éruptifs (vitesses de l'ordre de 700 à 950 km s^{-1}).

Voie lactée : nom de notre galaxie.

Zone convective : région externe de l'intérieur du Soleil. L'énergie produite par le cœur nucléaire y est transmise par convection. C'est la région de bouillonnement de la matière solaire.

Zone de transition : région de l'atmosphère solaire, entre environ 3 000 kilomètres et une quarantaine de milliers de kilomètres, où la température passe de 10 000 degrés à plus d'1 million de degrés.

Zone radiative : région de l'intérieur du Soleil comprise entre le cœur nucléaire et la zone convective. L'énergie produite par le cœur nucléaire y est transmise par rayonnement.

GLOSSAIRE DES NOMS ET DES SIGLES

Ap : indice de l'activité magnétique (Amplitude Planétaire).

BASS 2000 : "BAse de données Solaires Sol 2000" consacrée aux observations solaires obtenues à partir d'instruments au sol d'une part, et aux simulations ou extrapolations numériques concernant la physique solaire d'autre part.
(<http://bass2000.bagn.obs-mip.fr/> et <http://mesola.obspm.fr/>)

CDS : "Coronal Diagnostics Spectrometer", instrument d'observation du Soleil embarqué à bord du satellite SOHO. (<http://solg2.bnsc.rl.ac.uk/>)

CLUSTER : constellation de quatre satellites lancée en 2000 pour étudier la magnétosphère terrestre. Il s'agit d'un projet ESA-NASA. (<http://sci.esa.int/cluster/>)

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales, agence spatiale française.
(<http://www.cnes.fr/>)

CNRS : Centre National de Recherches Scientifiques. (<http://www.auteuil.cnrs-dir.fr/>)

DASOP : Département d'Astronomie Solaire de l'Observatoire de Paris.
(<http://www.dasop.obspm.fr/dasop/index.html>)

EHF : Extra High Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 30 et 300 gigahertz.

EIT : Extreme ultraviolet Imaging Telescope, instrument d'observation du Soleil embarqué à bord du satellite SOHO. (<http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/>)

ELF : Extra Low Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 10 hertz et 3 kilohertz.

ESA : agence spatiale européenne ("European Space Agency").
(<http://www.esrin.esa.it/export/esaCP/index.html>)

f_{10.7} : indice décimétrique, mesure du flux solaire à 10,7 cm (exprimé en $10^{22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$).

FOC : caméra d'observation des objets peu lumineux ("Faint Object Camera"), embarquée à bord du télescope spatial Hubble. Il s'agit d'un instrument de l'ESA.
(http://www.stsci.edu/ftp/instrument_news/FOC/topfoc.html)

GEO : Geostationary Earth Orbit, voir géostationnaire.

GSFC : Goddard Space Flight Center, centre de la NASA.
(<http://www.gsfc.nasa.gov/>)

HEO : Highly Eccentric Orbit, voir Molnya.

HF : High Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 3 et 30 mégahertz.

IAP : Institut d'Astrophysique de Paris. (<http://www.iap.fr/>)

IGRF : International Geomagnetic Reference Field, modèle empirique du champ géomagnétique. (<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/potfld/igrf95.html>)

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers. (<http://www.insu.cnrs-dir.fr/>)

ISAS : Institute of Space and Astronautical Science, centre japonais de l'espace et de la météorologie de l'espace. (<http://www.isas.ac.jp/e/>)

ISTP : International Solar-Terrestrial Physics. Programme créé en 1980 conjointement par trois agences spatiales, la NASA américaine, l'ESA européenne et l'ISAS japonaise. Les objectifs de l'ISTP sont avant tout scientifiques : déterminer la structure et la dynamique de l'intérieur du Soleil, comprendre l'activité solaire, le chauffage de la couronne, l'accélération du vent solaire, le milieu interplanétaire, l'impact sur l'atmosphère terrestre et la magnétosphère. Ce programme développe des instruments spatiaux et des modèles théoriques.
(<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/>)

Kp : indice de l'activité magnétique.

LEO : Low Earth Orbit, voir basse (orbite).

LF : Low Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 30 et 300 kilohertz.

LPARL : Lockheed Martin Palo Alto Research Lab. (<http://www.lpl.arizona.edu/>)

MDI : "Michelson Doppler Interferometer". Il s'agit d'un instrument optique (un interféromètre) embarqué à bord du satellite SOHO, et qui fait des images Doppler du Soleil. (<http://soi.stanford.edu/>)

MEDOC : centre d'opération et de données de SOHO.
(<http://www.medoc-ias.u-psud.fr/>)

MEO : Medium Earth Orbit, voir moyenne (orbite).

MF : Medium Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 300 kilohertz et 3 mégahertz.

MSIS : Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter (MSIS) model, ou modèle international de la haute atmosphère terrestre. La version MSIS-E est étendue jusqu'au sol.
(<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>)

NASA : agence spatiale des États-Unis d'Amérique, "National Aeronotic and Space Administration". (<http://www.nasa.gov/>)

NGDC : National Geophysical Data Center, centre de données géophysiques aux USA.
(<http://www.ngdc.noaa.gov/>)

NORAD : North American Aerospace Defence Command. Il s'agit d'un centre de commande binational (USA-Canada) qui est chargé des alertes en cas d'attaque

aérienne (ou par missile) d'un de ces pays, et organise les forces de défense contre une telle attaque. (<http://www.peterson.af.mil/norad/>)

PICARD : projet de microsatellite du CNES, qui se propose de procéder à des mesures simultanées, précises et absolues du diamètre du Soleil, de sa rotation différentielle, de la constante solaire et des variations de ces grandeurs. (<http://www-projet.cst.cnes.fr:8060/PICARD/Fr/index.html>)

RI : indice des taches solaires mensuelles.

RI₁₂ : indice moyen des taches solaires mensuelles.

SHF : Super High Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 3 et 30 gigahertz.

Skylab : première station spatiale américaine. (<http://www.ssl.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/skylab.htm>)

SOHO : SOLar Heliospheric Observatory. (<http://sohowww.estec.esa.nl/>)

THEMIS : Télescope Héliographique pour l'Etude du Magnétisme et des Instabilités Solaires. (<http://www.themis.iac.es/>)

TL : Temps Local, heure du lieu où l'on se trouve par rapport au Soleil.

TRACE : petit satellite développé par l'institut Lockheed à Stanford (USA) pour suivre l'évolution des structures magnétiques du Soleil. (<http://sunland.gsfc.nasa.gov/smex/trace/index.html>)

TU : Temps Universel, heure commune à tous les pays qui prend comme référence le méridien de Greenwich.

UHF : Ultra High Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 300 mégahertz et 3 gigahertz.

ULF : Ultra Low Frequency, onde radio de fréquence inférieure à 10 hertz.

ULYSSES : satellite conçu pour explorer la région de l'espace sous l'influence du vent solaire, en l'observant pour la première fois sous toutes les latitudes solaires. (<http://sci.esa.int/ulysses/>)

UVCS : Ultraviolet Coronagraph Spectrometer à bord de SOHO. (<http://cfa-www.harvard.edu/uvcs/>)

VHF : Very High Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 30 et 300 mégahertz.

VLF : Very Low Frequency, onde radio dont la fréquence est comprise entre 3 et 30 kilohertz.

WFPC2 : seconde caméra à large champ pour l'étude des planètes ("Wield Field Planetary Camera 2"), embarquée à bord du télescope spatial Hubble. Il s'agit d'un instrument de la NASA. (http://www.stsci.edu/instruments/wfpc2/wfpc2_top.html)

WIND : satellite d'observation du vent solaire de la NASA, situé près du point de Lagrange L1. (<http://lep694.gsfc.nasa.gov/waves/waves.html>)

YOHKOH : satellite japonais d'observation solaire qui travaille dans la gamme des rayonnements X et gamma. (<http://www.solar.isas.ac.jp/english/index.html>)

INDEX

accélération centripète	169	– interplanétaire	27, 94
activité solaire	34, 36	– magnétique	143, 151, 186
AE	180	– magnétique interplanétaire	135
albédo	66	changement climatique	125
amplitude planétaire équivalente	180	changement global de température	127
anneau de courant	84	chauffage	74
Année Géophysique Internationale	100	chauffage atmosphérique	117
année julienne	177	chevelure	204
– sidérale	176, 177	chimie atmosphérique	185
– tropique	177	chromosphère	32, 40
année lumière	8	climat	125
anomalie magnétique	62, 66	climat terrestre	126
ap	180	CNES	111, 120, 122
apogée	111, 207	coefficient de réaction	185
argument du périégée	208	coma	204
Ariane 5	110, 111	comète	203
Arianespace	120	communication hertzienne	106
ascension droite	208	communication téléphonique	106
astéroïde	206	compagnie d'assurances	128
atmosphère solaire	31	concentration moléculaire	181
– terrestre	66	conservation de l'énergie	166
attraction gravitationnelle	9	– du flux magnétique	44, 148
aurore polaire	88, 129, 135	consommation d'électricité	104
bande L	162	constante de Stefan	25
big-bang	8	constante solaire	24, 126
bulle de plasma	106	constellation de satellites	116
calendrier	177	contenu électronique total	106, 109
Cassini Huygens	197	contrôle d'attitude	112, 116
catastrophe naturelle	128	coquille magnétique	84
ceinture de Kuiper	203, 206	cornet polaire	87, 112
– de radiations de Van Allen	83	corotation	85
– de Van Allen	84, 85	corps noir	25, 158
ceinture de radiations	112, 135	corrosion	101
ceinture externe de radiations	84	Cosmos-954	121
ceinture interne de radiations	85	couche ionosphérique	
centre guide	165, 187	– région D	73
CERISE	120	– région E	73
champ dipolaire	151	– région F ₁	73
– électrique	143	– région F ₂	73
– gelé	166	courant aligné	85
– géomagnétique	61, 179	– de Birkeland	89

– de traversée de queue	84	– vibrationnelle	183
– géophysique induit	103, 104, 106	$f_{10.7}$	53
courant induit	103	Faint Object Camera	195
courbe photopique	156	farfadair	97
couronne solaire	34	feuillet de plasma	82
cycle de Bethe-Weizsäcker	140	fibrille	33
– de réactions nucléaires	140	filament	40, 42
– de Schwabe	36	flux d'énergie	154
– du carbone-azote	141	– de particules	147
– proton-proton	140	– gelé	27
– solaire	36, 126	force d'inertie	169
débris spatial	119	– de Coriolis	169
défense militaire	129	– de gradient	188
densité de courant	77, 147	– de Lorentz	164, 187
densité de flux	154	formule de Planck	158
deuxième loi de Kepler	174	– de Rayleigh	159
diffusion incohérente	211	– de Wien	159
dilatation de l'atmosphère	117	four nucléaire	19
discontinuité de Gutenberg	63	FREIA	115
dissociation	71, 74, 183	fréquence	161
durée d'une année	177	friction	117, 118, 119
éclairage	155	fusée	110
éclipse de soleil	105	galaxie	7
effet biologique	123	Galileo	195
effet d'un événement unique	112	Ganymède	195
effet Doppler	22, 152, 211	gaz parfait	137
éjection de masse coronale	49	géante rouge	11
ellipse	174	GEO	209
émittance	155	géostationnaire	209
énergie cinétique	137	géosynchrone	210
énergie interne	138	giration	165
équateur géographique	61	globule	9
équateur magnétique	64	GOES	114
équation d'état du plasma	166	graine	61
– de Faraday	144	granule	20
– de Poisson	143	Greenwich	60
équations de Maxwell	143, 148, 166	haute ionosphère	73
ERS	112	hauteur d'échelle	181
éruption solaire	42, 99	héliosphère	215
ESA	110	héliosynchrone	209
ESOC	110	hétérosphère	69
étendue optique	154	heure légale	61
étoile	7	– locale	61
étoile filante	206	– universelle	61
Europe (satellite de Jupiter)	195	homopause	69
excentricité	207	homosphère	66, 69
excitation	71, 74, 183	humidité relative	67
excitation électronique	183	inclinaison	111, 208
– rotationnelle	183	inclinaison apparente	209

indicatrice des intensités	155	macrospicule	31
indice d'activité magnétique	179	magnétopause	78, 95, 189
– de Wolf	38	magnétosphère	76, 78, 135, 189
– décimétrique	53	manteau solide	63
– magnétique	213	manteau supérieur	63
induction magnétique	143	Mars	193
infrarouge	162	Mars Global Surveyor	193
intensité	155	maser	162
International Solar Terrestrial Physics	219	masse	10
International Space Environment Service	219	MEO	209
inversion de température	68	Mercuré	192
Io	195	méridien	60, 171
ionisation	71, 73, 184	mésosphère	69
ionosonde	213	météore	205
ionosphère	71, 106	météorite	206
jet bleu	97	météorologie	218
– coronal	47	météorologie de l'espace	134, 217
– sidéral	178	milieu interplanétaire	135
– solaire	178	militaire	129
Jupiter	194	minimum de Maunder	126
Kourou	110	MIR	122
Kp	180	miroir magnétique	84, 87, 187
L1LO	209	mise en charge	115
lancement	110	modèle	136
latitude	61	modèle des rayons lumineux	154
LDEF	120	Molnya	210
LEO	209	moment magnétique	149
Léonides	206	naine blanche	11
LF	162	– brune	11
ligne de champ	151	– noire	11
ligne des nœuds	207	nébuleuse planétaire	11
lithosphère	63	nébulosité	127
lobe magnétosphérique	83	Neptune	198
loi barométrique	68	nœud	207
– d'Ohm	166	NORAD	120
– de Biot et Savart	147	noyau cométaire	204
– de distribution de Boltzmann	138	– externe	62
– de Lenz	144	– interne	61
– de polarité de Hale	37	nuage de Oort	203
– de Stefan-Boltzmann	160	nuage magnétique	94
– des aires	173	nucléosynthèse	11
– des gaz parfaits	138	nutaton	177
– des orbites	173	onde décimétrique	162
– des périodes	173	– électromagnétique	146, 161
lois de Kepler	173, 207	– millimétrique	162
longitude	60	orage magnétique	94, 95, 99, 102, 128
longueur d'onde	145, 152, 161	orbite	207
luminance	154, 160	– de satellites	111
Lune	200	– directe	209

– équatoriale	209	queue de plasma	205
– gelée	209	queue de poussière	205
– polaire	209	radiateur intégral	158
– quasi-équatoriale	209	radiation	123
– quasi-polaire	209	raie rouge	74
– rétrograde	209	raie verte	74
Orbiter	193	rayon cosmique	126
orbitographie	208	– de giration	186
ovale auroral	85, 88, 91	– de Larmor	165
ozone	68	rayons γ	163
parallèle	60	rayons X	163
périgée	111, 207	rayonnement	106
Perséides	206	– cosmique	202
personnel navigant	125	– visible	163
phasage	209	réaction nucléaire	11
photochimie	183	recombinaison efficace	185
photométrie	154	reconnexion	81
photonique	156	refroidissement atmosphérique	127
photosphère	24, 31	région de transition	34
pipeline	101	régolite	202
plage chromosphérique	40	rentrée atmosphérique	118
plan de l'écliptique	176	réseau électrique	102
plasma	166	– ferré	106
– atmosphérique	71	RI ₁₂	38
– gelé	166, 190	rotation sidérale	15
plasmaphère	85	satellite	111, 208
plume	45	Saturne	197
Pluton	199	second noyau stellaire	10
point d'impact	121	section efficace	184
– de Lagrange	209	séquence principale	11
– subsatellitaire	209	seuil d'excitation	183
– subsolaire	189	sievert	123
POLAR	133	sismologie solaire	20
pôle magnétique	66	Skybridge	116
positionnement global	108	Skylab	118
potentiel vecteur	149	SOHO	131
précession des équinoxes	176	Soleil	54
précipitation	106	– composition	12
premier noyau stellaire	9	– dimension	13
première loi de Kepler	173	– formation	11
pression	137	– rotation	14
– cinétique	168, 189	Soleil calme	29
– magnétique	168, 190	sous-orage magnétique	95
propagation	145	Space Environment Center	218
protubérance de région active	40	spationaute	124, 125
protubérance quiescente	42	spectre solaire	26
proxy	53	spicule	31
pulsation	145	spirale d'Archimède	28, 190, 205
pulsation cyclotron	165	SPOT	113, 121

sprite	97	tourbillon	172
Station Spatiale Internationale	123, 124	trace	209
statistique de Boltzmann	181	trans-horizon	129
stratosphère	68	transformateur	103
stratopause	69	transformateur électrique	102, 104
supergranule	22	troisième loi de Kepler	174
supernovae	11	troposphère	66
système de positionnement global	108	trou coronal	45
– solaire	57	ULF	162
Système International	156	ultraviolet	163
T Tauri	11	unité	156
tache solaire	34, 103	– astronomique	192
téléphone	106	– de flux solaire	53
télescope spatial	195	– lumineuse	156
Telstar-401	133	Uranus	197
température	137	vecteur d'onde	145
– de Curie	62	vent solaire	27, 29, 30, 45, 135, 189, 202
– exosphérique	74	vent solaire rapide	47
temps	61	Vénus	193
– local	61	VHF	162
Temps Universel	61	vitesse parallèle	187
Terrella	88	– perpendiculaire	187
THEMIS	77	– quadratique moyenne	138
théorème d'Ampère	148	VLF	162
– d'Ostrogradsky	143, 148	Voyager	197
– de Gauss	144	WIND	132
– de Maxwell-Ampère	144	YOHKOH	131
– de Stokes	144, 148	zone convective	20
thermosphère	71	– radiative	20
Titan	197		

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

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

Quelques constantes utiles.....	221
Bibliographie	223
Glossaire des mots	227
Glossaire des noms et des sigles.....	235
Index	239
Table des matières.....	245

