

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

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

EXTRAITS

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 ($= 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$).



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

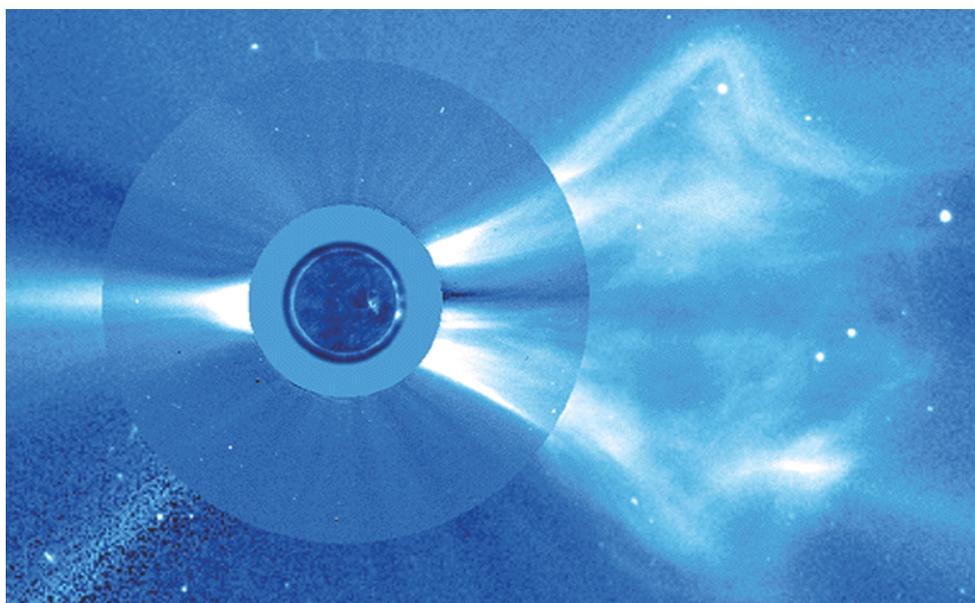


Figure 1.38 - A droite de l'image, une éjection de masse coronale
Ce montage, réalisé à partir des données de plusieurs instruments à bord de SOHO, montre également le Soleil au centre en bleu sombre. Les points blancs sont des étoiles. La structure magnétique de la couronne est bien visible au-dessus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

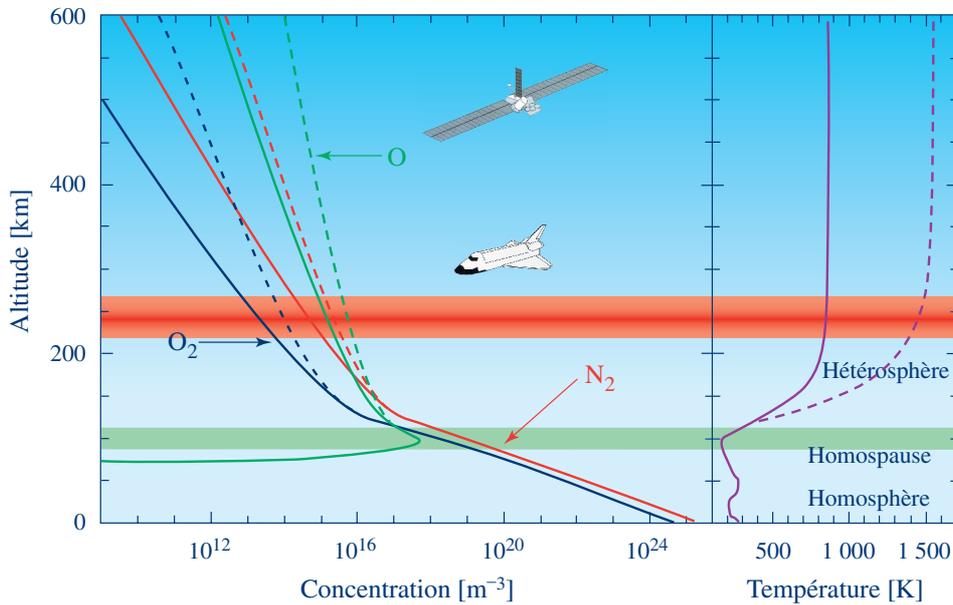


Figure 2.11 - Structure verticale de l'atmosphère obtenue par le modèle MSIS 95
 Il s'agit d'un début d'avril calme, à midi, à 45° de latitude nord : à gauche, profils de concentration ($[m^{-3}]$) des principaux constituants depuis le sol jusqu'à 120 kilomètres (N_2 en rouge, O_2 en bleu foncé, O en 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 : $H_i = \frac{k_b T}{m_i g}$.

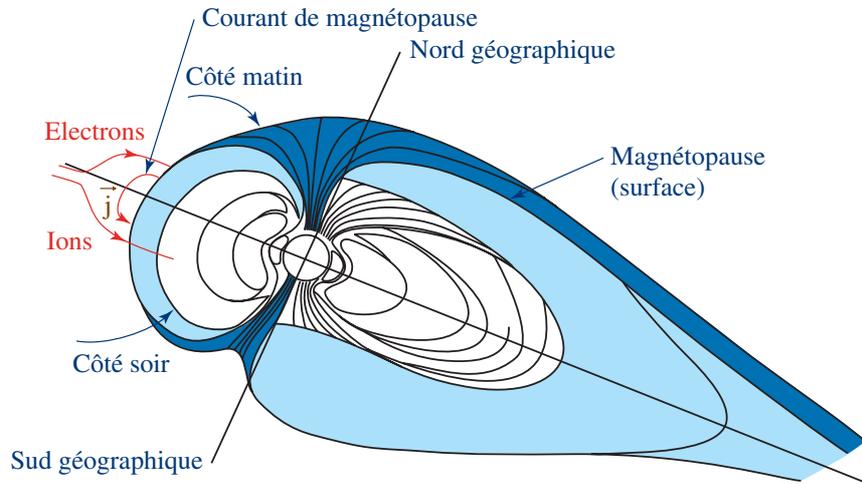


Figure 2.16 - Le vent solaire contourne la Terre et crée une surface protectrice, la magnétopause (ici en bleu)
 Les ions se dirigent côté soir, en avant de la page, et les électrons côté matin, en arrière de la page. Cette séparation des charges au voisinage de la Terre engendre le courant de magnétopause, représenté par la flèche rouge.

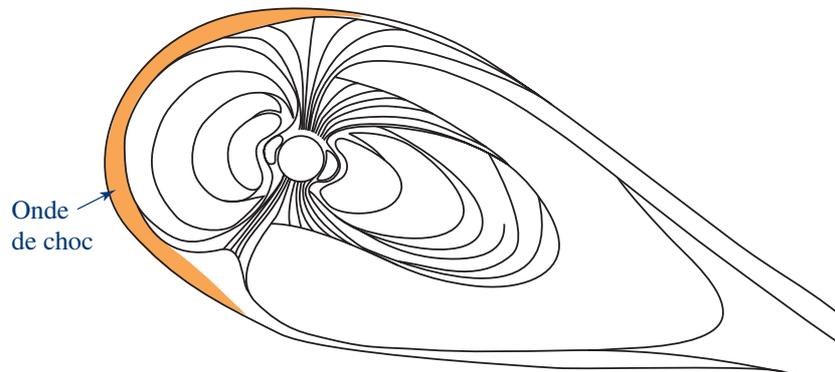


Figure 2.17 - En amont de la Terre, l'onde de choc (ici en orange) crée un échauffement du vent solaire. Celui-ci s'accélère avant de longer la magnétopause.

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

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).

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...

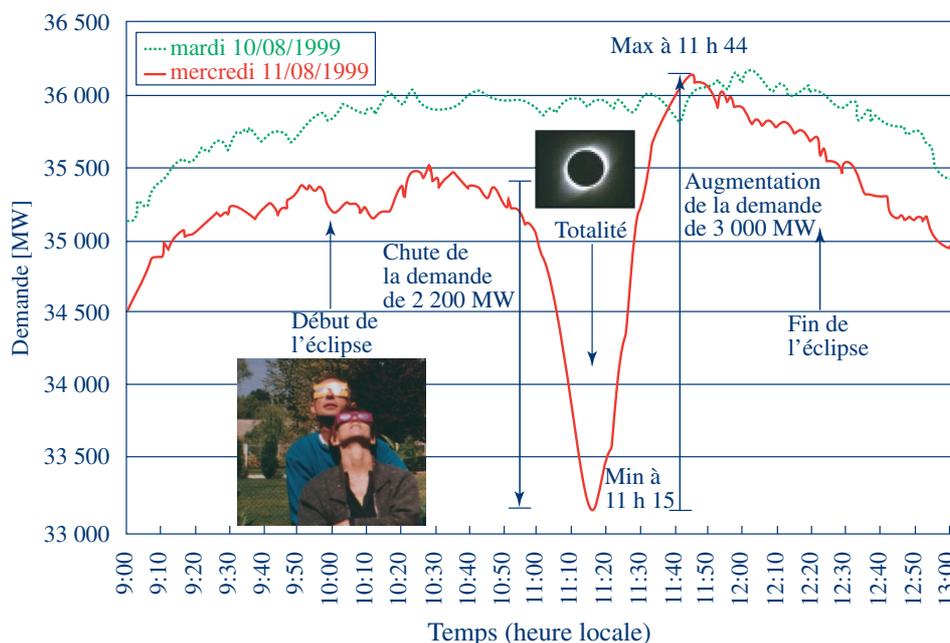


Figure 3.5 - Effet de l'éclipse totale de Soleil sur la demande d'électricité, en Grande-Bretagne, le 11 août 1999

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).

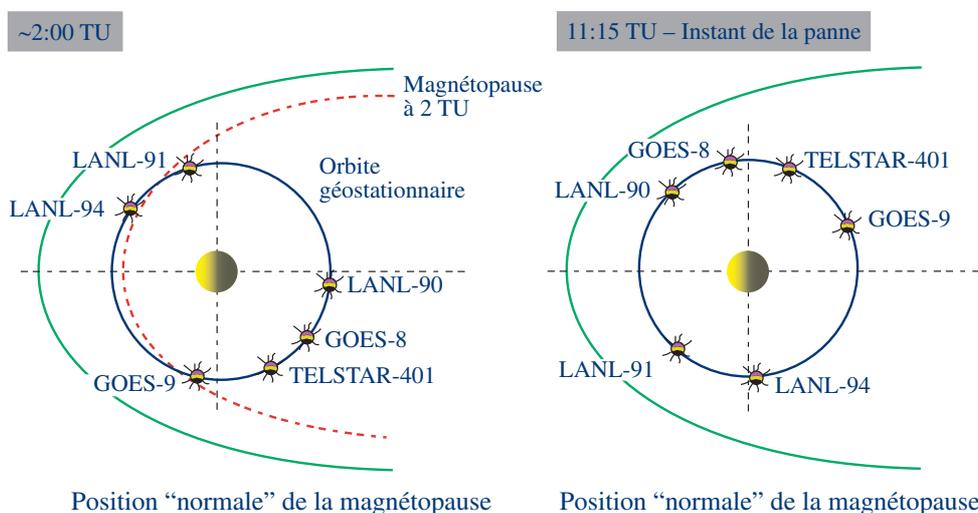


Figure 3.24 - Position des satellites géostationnaires (sur le cercle bleu)

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.

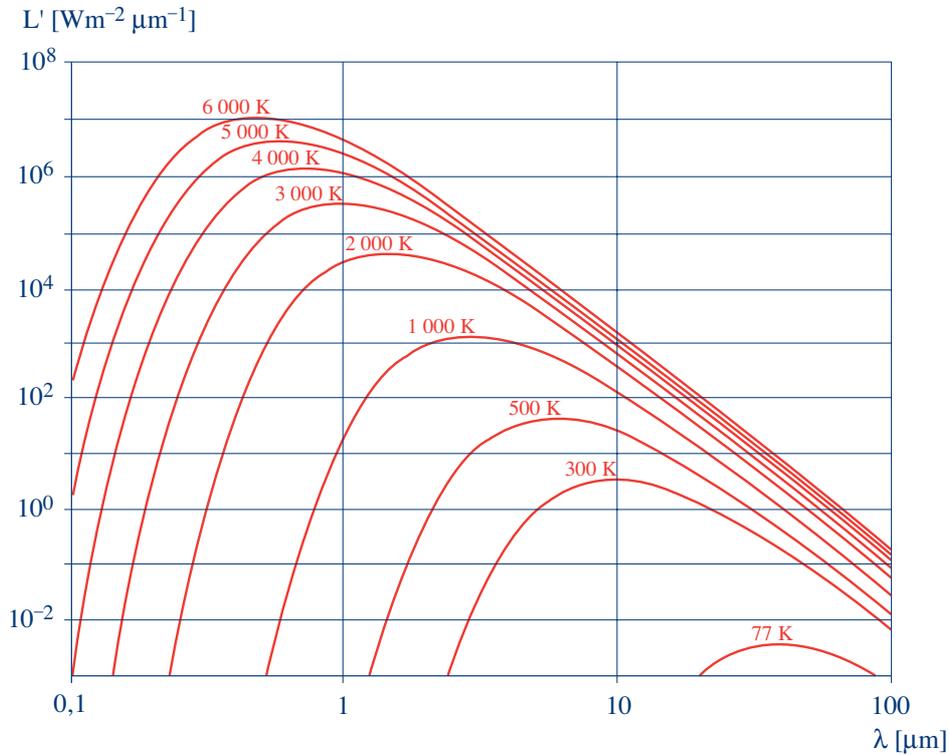
Le 11 janvier, le sous-orage débute vers 10 heures 30 TU, heure de la première intensification des aurores. Sur terre, elles sont particulièrement sensibles là où il est 23 heures locales ou 3 heures du matin locales. Un quart d'heure plus tard, l'ovale s'étend à la fois vers le pôle et vers l'est de 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.

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 :

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



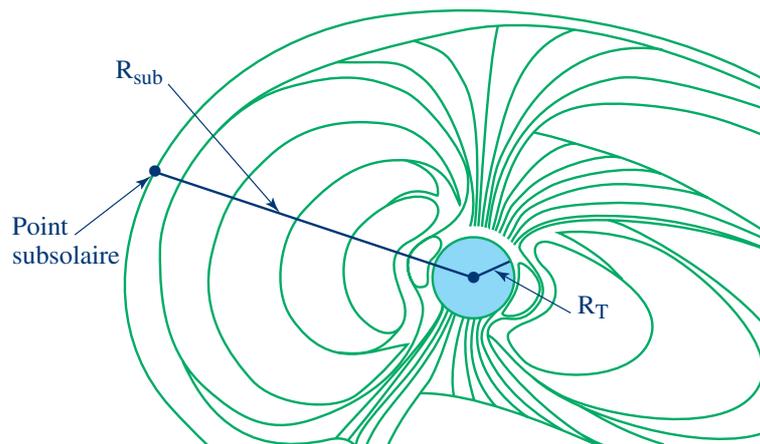
La propriété remarquable de l'émission du corps noir est illustrée par la figure ci-dessus : la luminance spectrique du corps noir varie en fonction de la longueur d'onde avec la température pour unique paramètre. Ainsi un corps noir à l'équilibre thermique a son maximum d'émission pour une longueur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

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

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 :

$$E = \frac{1}{2} m_{vs} \overline{v_{vs}^2}$$

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.