

Modue d'astronomie
Les aurores polaires
Contenu scientifique

1. Fonctionnement du soleil, création du champ magnétique solaire

Le Soleil est composé essentiellement d'hydrogène, l'atome le plus léger. L'hydrogène est l'association d'un électron – la particule de notre électricité – et d'un proton, particule électrisée, 1836 fois plus massive que l'électron. La charge électrique du proton compense exactement celle de l'électron, ce qui constitue encore une interrogation fondamentale de la physique. En conséquence, l'hydrogène est globalement électriquement neutre. Par convention, on dit que l'électron porte une charge négative, et le proton une charge positive. L'électron se trouve quelque part à distance du proton. Il ne tourne pas autour : un atome n'est pas un système solaire miniature ! Il se trouve simplement quelque part, mais à des distances déterminées, telle ou telle distance. Entre elles, il existe des zones « interdites » où l'électron ne peut jamais se trouver. Comme les pôles des aimants, une charge positive et une charge négative s'attirent, tandis que des charges de même signe se repoussent. La force qui est à l'œuvre s'appelle la force électromagnétique.

Comment fonctionne le soleil ? Pour le comprendre, nous allons faire une analogie, en regardant bouillir une soupe épaisse dans une casserole. La flamme de la cuisinière représente le noyau nucléaire du Soleil. La première est une source d'énergie chimique, qui ne crée ni ne détruit de matière, mais la transforme. La deuxième est une source d'énergie nucléaire.

Dans nos centrales nucléaires, nous cassons des atomes lourds (de l'uranium) en atomes plus légers. La somme des masses des atomes plus légers est moindre que celle de l'uranium. La différence a été transformée en énergie. C'est de la fission nucléaire.

La situation est différente dans le soleil. En premier lieu, les électrons, légers, passent sans discontinuer d'un proton à un autre, créant un fond électronique. Les protons sont plus massifs. Au centre du soleil, la pression est si élevée qu'elle surmonte la force de répulsion électromagnétique. Les protons s'imbriquent les uns dans les autres. Quatre d'entre eux fusionnent en un atome d'hélium. Cet atome est plus léger que la somme des quatre hydrogène initiaux. La différence de masse, là encore, s'est transformée en énergie, cette énergie qui fait briller le soleil. Mais il s'agit là de fusion nucléaire, et non de fission. Le projet ITER vise à recréer sur terre un tel processus, beaucoup plus efficace que la fission.

Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell définissent le comportement du champ électrique et du champ magnétique. Leur expression est relativement complexe, parce qu'elle fait appel à des outils mathématiques qu'on appelle des « opérateurs ». Cependant, plusieurs points importants en découlent directement et constituent l'un des fondements des phénomènes qui mènent aux aurores polaires.

Le premier point est le suivant : un groupe de charges électriques (on dit « une densité de charges ») génère un champ électrique. Lorsqu'il y a une séparation des charges électriques, le champ est conventionnellement dirigé des charges + vers les charges -.

Les équations de Maxwell (suite)

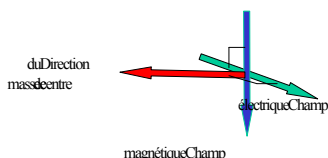
Ce qui génère un champ magnétique, c'est le mouvement de ces charges.

Si on se déplace avec des charges, on n'est soumis qu'au champ électrique. Mais l'observateur qui voit se déplacer des charges devant lui est soumis à un champ électrique et à un champ magnétique.

Deuxième leçon des équations de Maxwell : si des charges en mouvement créent un champ magnétique, un champ magnétique met en mouvement des charges fixes. Ces charges tournent autour du champ local, dans un sens ou dans l'autre selon le signe de leur charge.

Troisième leçon : une variation de champ magnétique accélère ou décélère les charges en mouvement. Cette variation de vitesse peut s'accompagner d'un changement de direction. Un champ magnétique externe crée une force qui sépare les particules électriques suivant le signe de leur charge (loi d'Ampère).

Quatrième leçon : une particule électrique placée dans un champ électrique seul subit une force qui dépend du signe de la charge électrique. Il en va de même pour une particule électrique placée dans un champ magnétique. Une particule électrique placée dans un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaire est contrainte de se déplacer perpendiculairement aux deux champs avec une vitesse et une direction moyenne qui ne dépend pas du signe de la charge.



Revenons à notre analogie culinaire.

Le fond de la casserole ne peut que transporter l'énergie du feu de la cuisinière vers la soupe. Elle « rayonne » l'énergie. On pourrait l'appeler une « zone radiative », mais « casserole » est sans doute plus commode.

Autour du cœur nucléaire solaire existe une zone dans laquelle la pression est encore trop élevée pour permettre aux particules de se mouvoir, mais pas assez pour surmonter les forces électromagnétiques et engendrer des réactions nucléaires. Tout ce que peut faire cette zone, c'est transférer l'énergie du cœur vers l'extérieur. On l'appelle la « zone radiative ».

La soupe de la casserole boue, c'est-à-dire que des bulles chauffées au contact de la casserole montent, se refroidissent en montant, puis redescendent. Elles forment une convection, exactement comme dans nos radiateurs électriques : de l'air froid, plus lourd, se réchauffe au contact de la résistance, s'élève dans la pièce et redescend un fois refroidi. On appelle pour cela ce type de radiateur un convecteur.

Autour de la zone radiative, la zone la plus externe du soleil est en ébullition : la pression y est assez faible pour permettre des mouvements convectifs. On l'appelle donc naturellement la « zone convective ».

Le cœur du soleil et la zone radiative tournent en quelques jours (probablement moins d'une dizaine). La zone convective tourne en 27 jours en moyenne (avec des différences entre l'équateur et les pôles). Il existe donc une zone de friction entre la zone radiative et la zone convective. De cette zone de friction, qu'on appelle la tachocline, naît le champ magnétique solaire.

2; Le vent solaire

Vues de loin, les bulles de soupe qui montent et qui descendent dans la zone convective ressemblent à des grains de riz. C'est pourquoi on les appelle des granulations. Selon notre analogie, il y a des gouttes qui s'échappent de la casserole (et qui retombent sous l'effet de la gravité terrestre...aucune simulation n'est parfaite!). De même, sur le soleil, l'ébullition entretient une éjection permanente de particules (électrons et protons), qu'on appelle le vent solaire. Les théoriciens du début du siècle savaient, depuis les expériences de Birkeland en 1903, que l'origine des aurores se trouvait dans l'éjection des particules du Soleil. Néanmoins, en raison de la masse élevée de l'astre, ils se refusaient à considérer que cette éjection puisse être permanente. C'est Parker, en 1955, qui réussit à montrer qu'en considérant une pression stellaire nulle à l'infini, la couronne solaire n'est pas en équilibre hydrostatique. Dès lors, un flux de particules peut s'en échapper de façon continue. Il a appelé ce flux du joli nom de vent solaire.

Puisque ces particules sont électriquement chargées, elles créent un champ magnétique. Mais, et là encore s'arrête notre analogie avec une soupe, le mécanisme qui les expulse est lui-même d'origine magnétique. Dans leur éloignement au Soleil, protons et électrons longent les lignes magnétiques locales. C'est le même problème que celui de la prééminence de la poule et de l'œuf : les particules longent les lignes de champ et créent un champ par leur mouvement. On dit que le champ est gelé dans les particules. On peut aussi bien considérer le vent solaire sous son aspect corpusculaire que sous son aspect magnétique. Dans ce deuxième cas, on parle de « champ magnétique interplanétaire ».

La surface du Soleil, qu'on appelle la photosphère, forme la frontière entre l'intérieur solaire et l'atmosphère solaire. Le vent solaire est issu de la photosphère, comme la lumière solaire.

La partie ionique du vent solaire est composée de 95% d'ions H^+ (des protons) et 5% d'ions He^+ . Dans le plan de l'écliptique, au niveau de l'orbite de la Terre, il souffle à une moyenne de 370 km.s⁻¹. Cependant de récentes observations du satellite ULYSSE ont montré que cette vitesse augmentait jusqu'à 750 km.s⁻¹ environ au-dessus de certaine régions appelés « trous coronaux ». A une unité astronomique, sa densité est d'environ 5 ions et 5 électrons par centimètre cube dans le plan de l'écliptique (donc, chaque seconde, à peu près 400 millions de particules traversent chaque centimètre carré à une telle distance). La sonde ULYSSE a également mesuré que cette densité était divisée de moitié au dessus des trous coronaux (voir plus loin).

En moyenne, le vent solaire fait perdre 10^{14} kilogrammes au Soleil par jour, à peine quatre fois moins que la masse perdue sous forme de rayonnement dans les réactions nucléaires du cœur. Comme la masse solaire est de $2 \cdot 10^{30}$ kg, il faudrait plus de cinq cent milliards de siècles pour vider totalement notre étoile par ce biais, ce qui est bien supérieur à l'espérance de vie solaire, qui est de 5 milliards d'années. En définitive, la masse éjectée sous forme de vent solaire est totalement négligeable.

La zone dans laquelle le vent solaire est assez compact pour être visible lors des éclipses par la Lune s'appelle la couronne solaire.

Unité astronomique : distance moyenne entre la Terre et le Soleil. Comme tous les astres, la Terre a une orbite elliptique. Le cercle n'est qu'une ellipse particulière. L'orbite de la Terre n'est pas sphérique. Il y a une distance la plus proche au Soleil (périhélie) et une distance la plus grande (aphélie). La moyenne, l'Unité Astronomique, vaut $1,496 \cdot 10^{11}$ m.

3. L'activité solaire, les cycles solaires

La rotation du Soleil est différente selon qu'on se trouve au pôle ou à l'équateur, et différente selon qu'on est sur la photosphère ou à l'intérieur de la zone convective. La friction sur la zone radiative est complexe, et engendre un nombre élevé de phénomènes regroupés sous l'appellation « d'activité solaire ». Il est important de noter que tous ces phénomènes ont pour origine les variations du champ magnétique de l'étoile. Plusieurs d'entre eux n'ont aucune influence sur les aurores polaires et, malgré leur intérêt propre, n'ont pas à être décrits dans cet exposé. On peut tout de même les mentionner. Il s'agit des taches solaires, de la variations du flux EUV, XUV ou radio.

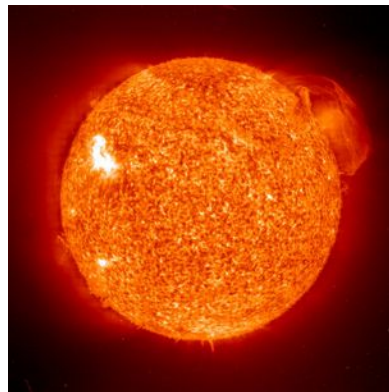
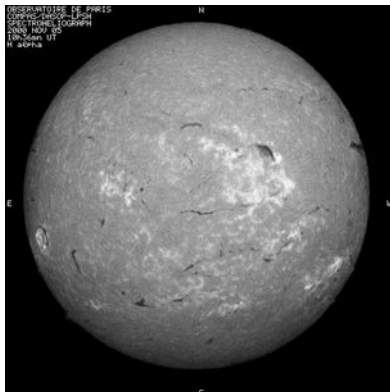
a) Protubérances et éruptions

On distingue parfois des structures longues, sombres, au-dessus du disque solaire. Ces filaments s'élèvent depuis des couches basses, plus froides, vers des couches plus chaudes. Vus sur le côté, les mêmes structures paraissent au contraire brillantes sur le fond du ciel. Elles ont souvent l'aspect d'arches dont l'altitude s'élève parfois à cent mille kilomètres. On les appelle alors des protubérances. Le satellite SOHO (ESA-NASA) nous a dévoilé les transports de matière qui s'y déroulent, rapides, permanents. La mesure du champ magnétique des protubérances a révélé des valeurs cinquante fois plus intense que le champ magnétique solaire.

b) Les trous coronaux

Le rayonnement X solaire est émis par les hautes couches de l'atmosphère solaire. Leur observation montre presque systématiquement de larges plages peu lumineuses, très mobiles, peu denses, plus froides que la couronne (un à deux millions de degrés dans un environnement à plusieurs millions de degrés), qui peuvent couvrir jusqu'à un tiers du Soleil. On les appelle des *trous coronaux*. En période calme, ils sont essentiellement localisés aux pôles, et leur champ magnétique est très largement ouvert vers l'espace, constituant une porte de sortie du vent solaire. En période active, ils sont fragmentés dans l'ensemble de la couronne solaire, comme des îlots dans un océan. Le vent solaire qui s'en évacue va presque deux fois plus vite que le vent solaire à l'entour. Il est appelé *vent rapide*.

Lorsque les trous coronaux se développent vers les basses latitudes, en période solaire active, du vent rapide se mélange à du vent lent. Il le bouscule (l'interaction est encore électromagnétique), 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 interplanétaire lui aussi se met à varier, au gré de la vitesse et de la direction des particules



A gauche, la photosphère est photographiée le 5 novembre 2000 (en période active) à 656,3 nm, à Meudon. On y voit de nombreux filaments, des taches solaires, des zones brillantes (crédit DASOP-Observatoire Paris Meudon – CNRS). A droite, le télescope EIT photographie une protubérance, visible sur le fond du ciel (crédit EIT – SOHO, ESA-NASA)

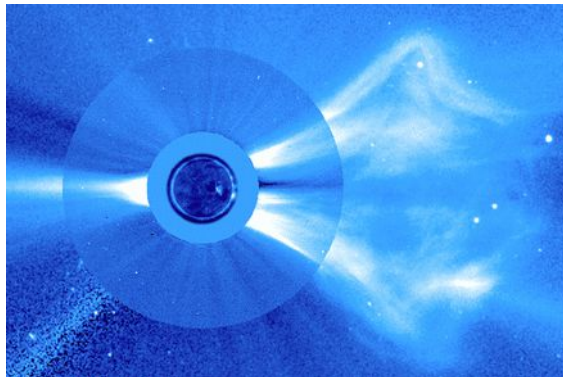
Une protubérance peut durer jusqu'à trois rotations solaires. Souvent, l'énergie qui y est piégée se libère brutalement : en quelques minutes, une éruption solaire met fin au filament. Cette expulsion s'accompagne de rayonnement intense dans toutes les longueurs d'ondes, et souvent d'émission de particules de haute énergie qui alimentent le vent solaire permanent. Les éruptions connaissent des cycles d'environ 11 ans : lorsqu'elles sont plus fréquentes le Soleil est « actif », et lorsqu'elles sont quasi inexistantes il est dit « calme ». Il faut environ 11 ans pour passer d'un état calme à un autre état calme, en passant par un état actif. Ce cycle est appelé « cycle de Schwabe ». En 1995 a commencé le 23ème cycle (on les date depuis la première observation régulière en mars 1755). Les cycles 21, 22 et 23 ont été plus intenses que les cycles précédents.

Dès les premières mesures spatiales consacrées au Soleil, et en particulier avec le satellite Skylab (NASA) dans les années 1970, on avait observé un autre type de protubérances, surnommées « quiescentes ». Celles-ci ne semblent pas en relation avec des taches solaires, à l'inverse des protubérances de zone active. Leur élévation est très supérieure cependant : elles peuvent atteindre 100 000 kilomètres (soit 0,15% du rayon solaire). Pourtant, leur champ magnétique est de l'ordre d'une dizaine de fois le champ magnétique global solaire. Elles peuvent elles aussi donner naissance à une éruption.

c. Les éjections de masse coronale

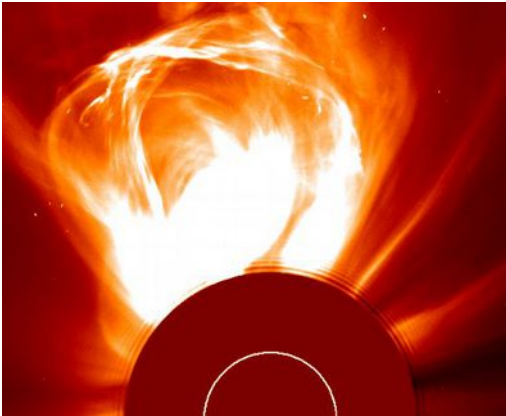
SOHO a cependant dévoilé que les éruptions n'étaient pas les phénomènes les plus violents ni les plus fréquents dans l'atmosphère solaire. Pour cela, il a été nécessaire d'utiliser un appareil mis au point par l'astronome français Lyot au début du 20ème siècle : un coronographe. L'idée est relativement simple : il s'agit de simuler une éclipse. Un disque occulteur est placé au centre du télescope, de façon à supprimer la lumière directe intense et voir les détails diffus et peu lumineux de la couronne.

Trois coronographes ont été embarqués à bord de SOHO, mais deux seulement ont fonctionné correctement. Ils ont des champs de vue différents, et on code leur couleur en orange pour l'un, en bleu pour l'autre. Un cercle blanc sur les images figure la taille apparente du Soleil derrière l'occulteur. L'atmosphère solaire devient alors accessible. En période calme, elle exhibe une forme de soucoupe volante, avec deux jets visibles de part et d'autre du Soleil. Mais lorsque le Soleil est dans une phase active, les jets se produisent dans toutes les directions. La couronne prend alors une apparence sphérique



une éjection de masse coronale en période solaire active. 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)

Mais quelque soit la période d'activité solaire, l'atmosphère solaire est le siège de phénomène éruptifs considérables, qui durent de quelques minutes à quelques heures. Leur échelle dépasse de loin celle des éruptions, pouvant affecter plus du tiers de la couronne, à des altitudes de plusieurs rayons solaires. Ces éruptions, qui arrachent la matière de la couronne solaire, ont reçu le nom d'éjections de masse coronale. Elles ne sont pas soumises à l'existence d'éruptions plus bas vers le Soleil ou à la présence de taches solaires. Leur occurrence varie de 0,5 à 3 fois par jour terrestre, selon qu'on est en période de faible ou forte activité solaire. Les particules sont éjectées à des vitesses de 100 à 2000 kilomètres par seconde, avec une moyenne qui se situe à environ 300 kilomètres par seconde.



spectaculaire éjection de masse coronale vue par le coronographe LASCO à bord de SOHO. La taille du Soleil est figurée par un rond blanc (crédit LASCO – SOHO, ESA-NASA)

Il existe d'autres cycles d'activité solaire, moins important pour la création des aurores polaires. Le cycle magnétique est le double du cycle de Schwabe (environ 22 ans). Il pourrait exister des cycles à plus grande échelle, encore hypothétiques (de l'ordre de 200 ans).

Ce qu'il faut retenir de l'activité solaire pour les aurores :

- 1) Le soleil émet en permanence un flux de particules (le vent solaire), lent (moyenne de 370 km/s à 1 UA) ou rapide (moyenne de 750 km/s) au-dessus des trous coronaux**
- 2) Il est le siège d'une activité éruptive multiple, avec des éjections de particules jusqu'à plus de 2000 km/s**
- 3) Celle - ci a diverses échelles de temps, depuis la minute jusqu'au siècle (encore hypothétique). Il existe un cycle d'activité régulier d'environ 11 ans, qu'on appelle le « cycle de Schwabe ».**

L'énergie des particules

Dans un gaz, les particules sont animées d'un mouvement thermique. Plus la température est élevée, plus elles se déplacent rapidement. On relie l'énergie à la température selon : $E = \frac{\delta}{2} kT$

Dans lequel E est l'énergie en Joules, T la température en Kelvin, k la constante de Boltzmann ($1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$). δ représente le nombre de degrés de liberté, c'est-à-dire le nombre d'axes sur lesquels les particules peuvent se mouvoir. Il y a 1 degré de liberté par axe. Dans un gaz naturel, δ vaut 3. Dans un plasma soumis à un champ magnétique (c'est le cas du vent solaire), il n'y a que 2 axes possibles libres, car le champ impose le troisième. δ vaut alors 2.

Mais les particules du vent solaire ne sont pas relativistes. Leur énergie s'écrit classiquement

Où m est la masse de la particule, et v sa vitesse. L'énergie des particules du vent solaire s'exprime ordinairement en électron volts (eV), unité mieux adaptée aux phénomènes décrits. $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

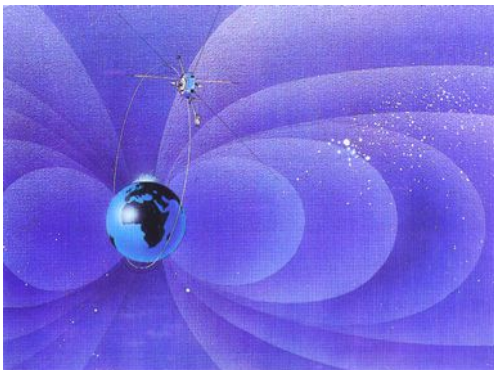
Un proton de masse $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ a, selon cette formule, une énergie de 715 eV

En égalant ces deux équations, on voit que dans cette approche, on peut parler d'énergie, de température ou de vitesse pour désigner des quantités semblables. La température de notre proton à 715 eV est, selon la première formule, 8,3 millions de K. Il s'agit d'une température cinétique, et non, comme dans la vie courante, d'une température thermodynamique. On peut l'imager en disant que si on s'expose au vent solaire, on ne reçoit rien en moyenne car il y a très peu de particules, le vide est très poussé. Mais si on reçoit un proton, il est à une température de 8,3 millions de degrés.

4) Le champ magnétique terrestre

Le centre de la Terre s'appelle le noyau interne, ou graine. Il est composé de nickel et de fer. Sur un rayon d'un peu plus de 1200 kilomètres, il est aujourd'hui solide : il était liquide à la formation de notre planète, mais cette partie là s'est cristallisée. La sphère qui l'entoure nous fait franchir 1700 kilomètres dans un milieu composé à peu près de la même matière, fer et nickel, mais visqueux cette fois. On l'appelle noyau externe, ou graine liquide. 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. C'est du mouvement de ce mélange métallique visqueux que naît le champ magnétique terrestre. Certes, le métal est globalement électriquement neutre. Cependant, la température est telle que les électrons les plus éloignés du noyau atomique sont libres d'aller et venir d'un atome de métal à l'autre : leur mouvement est erratique. Les ions, en revanche, possèdent un mouvement d'ensemble suffisamment ordonné pour que de l'addition de tous les moments magnétique émerge un champ macroscopique. Ce mouvement est entretenu par l'énergie de cristallisation sur la graine solide, par la force centrifuge due à la rotation de la Terre, par la gravité également ... Ce mouvement est comparable à celui d'une rivière lente, comportant ses tourbillons propres, ce qui génère en surface des anomalies locales de champ magnétique. Les régions où la surface de la Terre intersecte l'axe perpendiculaire à ce tourbillon définissent les pôles nord et sud magnétiques, ceux vers lesquels pointent les aiguilles des boussoles. Ils se trouvent éloignés des pôles géographiques : le pôle nord magnétique a pour coordonnées 78,5 °N et 103,4 °W degrés, près de l'île d'Ellef Ringnes au Canada. Le pôle sud magnétique est à 65 °S et 139 °E degrés, dans la baie du Commonwealth en Antarctique. Ces coordonnées évoluent d'année en année, au gré de l'orientation du tourbillon interne à la Terre.

Lorsque la spirale de la rivière métallique 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.



Le champ magnétique terrestre est « dipolaire », avec un pôle nord et un pôle sud. Si on trace des lignes où il est constant (les lignes de champ), on obtient cette structure classique.

Pression cinétique et pression magnétique

La pression est une force par unité de surface. Lorsqu'on parle de particules en mouvement, la pression est cinétique. Elle vaut

$$P_c = nkT$$

Dans lequel T est la température en Kelvin, k la constante de Boltzmann ($1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$). et n le nombre de particules par unité de volume.

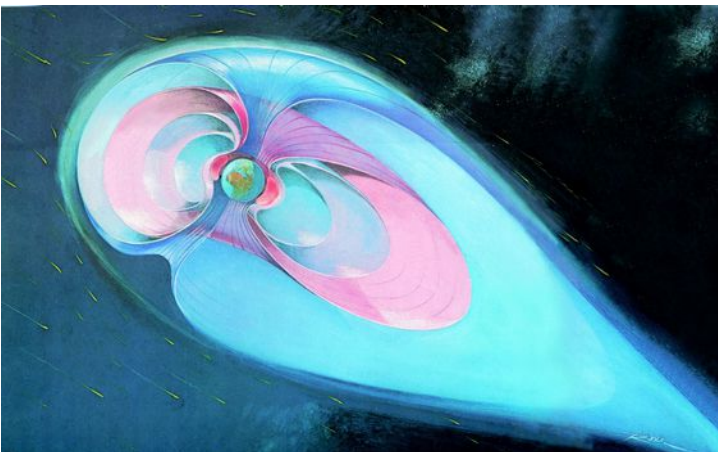
On peut également définir une pression magnétique, selon $P_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$

Dans lequel B est l'intensité du champ magnétique et μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ($1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$)

La pression du vent solaire est cinétique. La pression du champ géomagnétique est magnétique.

5) La magnétosphère

Le vent solaire a une vitesse de l'ordre de 300 à 800 kilomètres par seconde. Celle-ci dépend peu de la distance au soleil. En revanche, elle dépend de l'activité du soleil. A mesure que le vent voyage, il se répand sur la surface d'une sphère de plus en plus large. Sa pression, proportionnelle à sa concentration, varie alors comme le carré de la distance du soleil. L'équilibre de la pression du vent solaire et de la résistance à cette pression par le champ magnétique de la planète détermine une frontière magnétique, la magnétopause. La partie de l'espace qui est dominée par le champ magnétique de la planète est la magnétosphère. Du côté jour, le côté où la planète voit le rayonnement solaire directement, l'équilibre de ces deux forces se trouve à une distance moyenne de 10 rayons terrestre pour la Terre et une centaine pour les planètes géantes. Du côté nuit elle s'étend dix fois de plus. Si on pouvait voir avec nos yeux les lignes du champ magnétique on verrait une forme ressemblant à l'image d'une comète, avec des lignes fermées et aplaties du côté "jour" et très élongées, étirées, du côté nuit formant une longue queue.

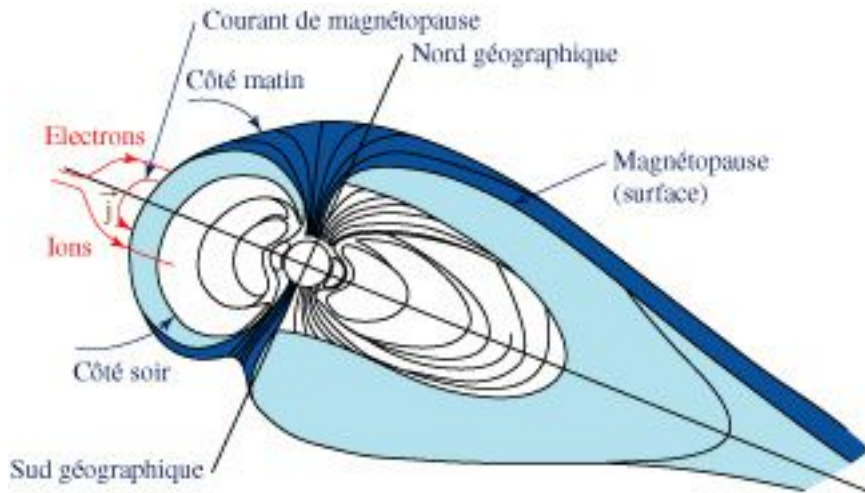


Forme de la magnétosphère, résultant de la déformation du champ terrestre dipolaire par le vent solaire

Peu de particules peuvent traverser la frontière – la magnétopause – sur laquelle la pression du champ magnétique compense celle du vent solaire. Cette frontière se situe typiquement à 10 rayons terrestres côté jour, valeur qui est descendu jusqu'à 6 en octobre 2003, à l'occasion d'un événement solaire particulièrement intense.

6) Séparation de charges et création du champ électrique magnétosphérique

De façon extrêmement simplifiée, côté jour, le vent solaire, en approchant de la Terre, « voit » le champ géomagnétique qui, selon la loi d'Ampère, crée une séparation de charges. Davantage d'ions dérivent le long de la magnétopause côté est, et davantage d'électrons côté ouest, générant un champ électrique qui traverse toute la magnétosphère.



7) Les points d'entrée de la magnétosphère

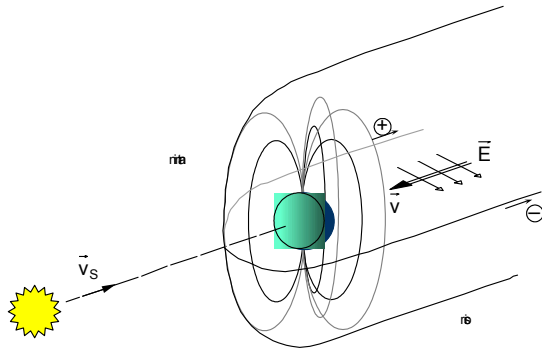
La magnétopause est une frontière poreuse. En la longeant, une partie des particules du vent solaire parvient à dériver et à pénétrer dans la cavité magnétosphérique, côté nuit. D'autres se rejoignent à une distance d'environ 30 rayons terrestres côté nuit, dans la zone dite de reconnexion. Face au Soleil, des entrées directes sont possibles selon l'état magnétique du Soleil et du vent solaire.

Les particules qui se retrouvent dans la magnétosphère subissent une forte accélération vers la Terre, sous l'effet conjugué du champ électrique et des variations de champ magnétique interplanétaire.

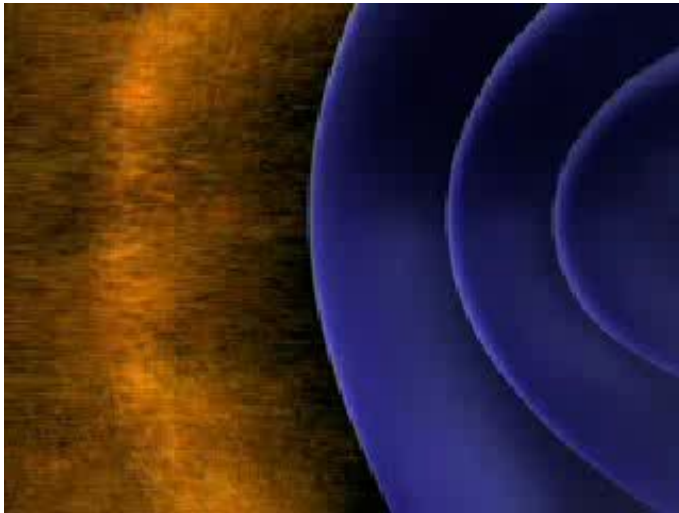
La vitesse des électrons augmente jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde.

Pourtant, plus les particules s'approchent de notre planète, plus l'intensité du champ géomagnétique est élevée. A quelques rayons terrestres (de 5 à 10), il devient si intense que les électrons et les ions ne peuvent continuer : ils sont contraints de créer un anneau de courant autour de la planète : la ceinture de Van Allen puis, au gré des collisions, de suivre une ligne du champ magnétique locale pour pénétrer enfin dans l'atmosphère. Pour décrire ces particules, on utilise le joli mot de « précipitations », par analogie bien sûr avec la météorologie classique.

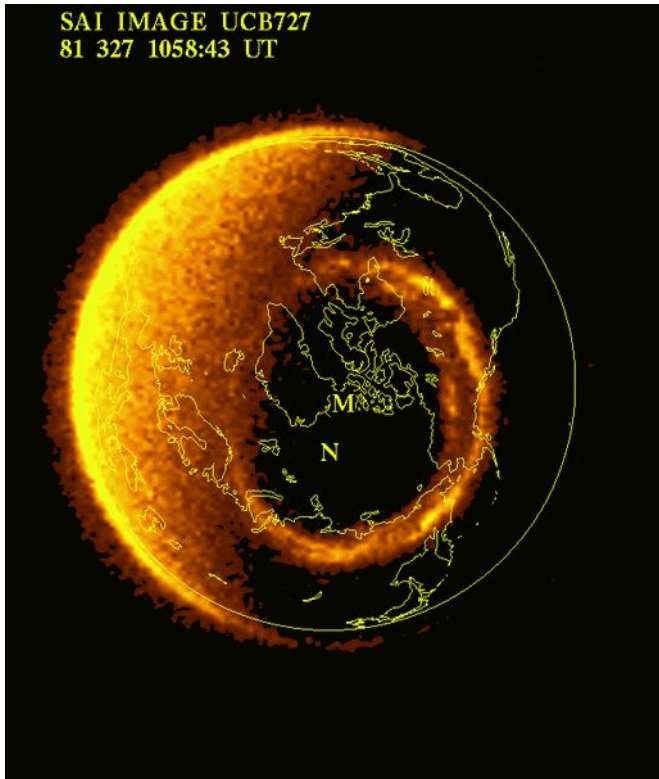
En 3 dimensions spatiales, il vaut mieux représenter le champ géomagnétique par des coquilles que par des lignes : les particules ne remplissent pas la zone comprise entre deux lignes du champ magnétique, mais plutôt le volume entre deux coquilles. Les pieds de ce volume tracent sur la Terre deux ovales appelés ovale auroraux, typiquement situé entre 65° et 75° de latitudes magnétiques nord et sud. Ces deux ovales existent en permanence, car le vent solaire souffle de façon continue.



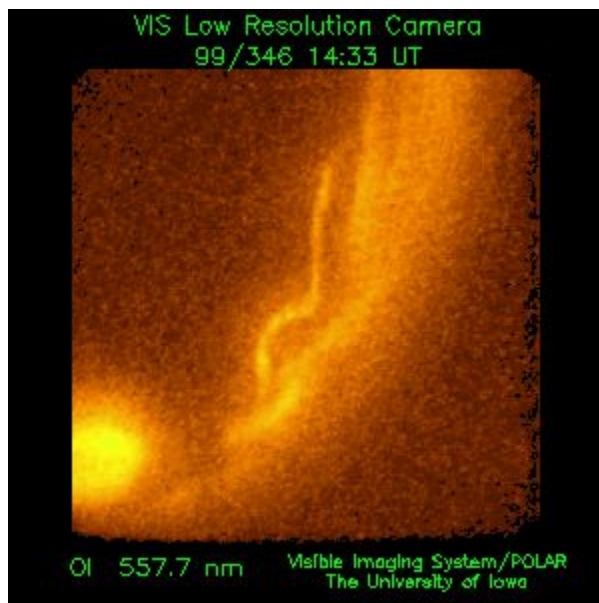
A l'intérieur de la magnétosphère, on se trouve dans un milieu soumis à un champ électrique d'une part, et à un champ magnétique perpendiculaire d'autre part. Leur action conjointe force les particules du côté nuit à se diriger vers la terre, quel que soit le signe de leur charge électrique.



Cette animation montre les divers points d'entrée du vent solaire dans la magnétosphère. En premier lieu, côté jour. Ensuite, par les bords est et ouest, les particules étant alors forcées de revenir vers la Terre en s'accéléralant. Enfin, via les cornets polaires. Pour les aurores polaires, seul le second cas est réellement important. Il est à noter que ce film, comme hélas tous les films de la NASA et de l'ESA, se trompe en montrant la terre dans l'axe nord sud. Le champ électrique étant est-ouest, il serait beaucoup plus compréhensible de montrer ces phénomènes vus du dessus d'un des pôles.



Photographie de l'ovale auroral dans l'UV
(Dynamics Explorer, NASA)



Gros plan sur l'ovale auroral dans le visible (le vert, mais l'image est recolorisée), qui montre sa dynamique (NASA)

Les états d'excitation, l'ionisation

Les particules du vent solaire, transitant dans la magnétosphère, sont piégées par le champ magnétique terrestre et contraintes de se déposer dans les ovales auroraux. Elles heurtent le gaz atmosphérique à haute altitude, créant excitation et ionisation.

Excitations vibrationnelles : bandes

Lors d'une collision avec une particule ou lors de l'absorption d'un photon, la vibration de la molécule le long de son axe internucléaire peut se retrouver excitée. La fréquence typique pour ces vibrations est de l'ordre de 10^{12} Hz. Lors de la désexcitation, cela correspond à une émission dans le proche infrarouge. Les seuils d'énergie des *excitations vibrationnelles*, c'est à dire l'énergie à apporter à la molécule pour générer une telle excitation, vont du centième au dixième d'électronvolt.

Un état vibrationnel se définit par un nombre quantique v . Lors d'une transition vibrationnelle, l'état initial s'appelle v' et l'état final v'' . Une transition vibrationnelle définit une *bande*, qu'on note entre parenthèses : bande (2,1), bande (4,2).

Excitations rotationnelles : raies

Au cours d'une excitation, la rotation de la molécule tout entière autour de l'axe perpendiculaire à l'axe internucléaire peut être excitée. On a alors affaire à une *excitation rotationnelle*, de fréquence caractéristique 10^{10} Hz, avec des seuils d'énergie de l'ordre du millième d'électronvolt. L'émission qui accompagne la désexcitation se fait dans l'infrarouge sous forme de *raies d'émission*.

Excitations électroniques : systèmes

Il s'agit du transit d'un électron, souvent le plus externe mais pas toujours, vers un niveau énergétique supérieur. Les fréquences typiques pour l'*excitation électronique* et la désexcitation sont de 10^{15} Hz, avec des variations d'énergie de l'ordre de l'électronvolt à la dizaine d'électronvolts. Une transition entre deux états électroniques définit un système. Les émissions électromagnétiques accompagnant une désexcitation électronique sont dans le visible et dans l'ultraviolet.

Ionisation

Il s'agit de l'arrachage d'un électron de l'atome ou de la molécule cible. Les seuils d'énergie pour l'ionisation sont tous de l'ordre de la dizaine à la vingtaine d'électronvolts, bien supérieurs aux seuils d'excitation. Il est de 13,6 eV pour l'hydrogène atomique, puis respectivement 13,61 ; 12,10 ; 15,58 eV pour O, O₂ et N₂. Pour chaque ion, plusieurs états excités sont possibles.

Les désexcitations

Les particules excitées ont plusieurs voies de désexcitation. L'une est la chimie. L'autre est la relaxation de l'énergie d'excitation par une émission électromagnétique, parfois lumineuse (c'est-à-dire visible), 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

8) Les aurores polaires

Les particules précipitées vont heurter le mélange de gaz atmosphérique. Elles sont toutes absorbées au-dessus de 70 kilomètres environ. Certaines collisions ne sont que de simples collisions élastiques, qui renvoient une partie du flux entrant vers l'autre hémisphère. D'autres collisions peuvent chauffer les électrons ambiants : sous l'effet de fortes précipitations, la température des électrons peut atteindre 9000 K à 300 km !

On peut également exciter et/ou ioniser l'atmosphère. Ainsi, sous l'effet d'une collision, une molécule neutre peut, comme un personnage de dessin animé, se mettre à vibrer dans différentes directions, à tourner sur elle-même. On dit qu'elle est dans un état excité. Elle revient à son état fondamental en émettant des ondes électromagnétiques, parfois dans le domaine visible : cela donne naissance au magnifique phénomène des aurores polaires.

Cependant, il faut aux particules précipitées suffisamment d'énergie pour que les aurores soient visibles à l'œil nu. Le vent solaire lent n'est pas assez rapide pour cela. Il est nécessaire que les précipitations trouvent leur origine dans du vent solaire rapide, dans des éruptions ou dans des éjections de masse coronale.

Même ainsi, on ne peut voir les aurores que pendant la nuit, car si l'ovale auroral existe en permanence, sa lumière est si ténue qu'elle est écrasée par celle du jour, et même par celle de la pleine lune. Comme elles se produisent au-dessus de 70 km, il faut également un ciel clair pour les voir. Ces conditions sont réunies en particulier en hiver, par les grands froids secs, ce qui a fait associer à tort les aurores avec l'arrivée du froid. Souvent, le phénomène commence par des faisceaux de lumière blanche pâle qui semblent tomber vers la Terre. Le phénomène s'intensifie en une quinzaine de minutes; il prend l'allure d'un voile qui oscillerait sous l'effet d'un hypothétique vent. En s'intensifiant, l'aurore se diapre de rouge en bas du voile, qui parfois frise le mauve. Plus en altitude, on distingue des franges de vert. A chaque instant se crée une nouvelle composition de couleurs, dans un silencieux ballet. En période de forte activité solaire, les aurores peuvent se succéder chaque nuit, alternant les tableaux : aurores diffuses, d'un vert dont les mouvements semblent imperceptibles, aurore rouge, grands arcs aux couleurs laiteuses homogènes, aurores rayées, dans lesquelles des stries verticales de couleurs alternent avec des zones d'ombre... Dans tous les cas, l'intensité lumineuse est si faible qu'on peut voir les étoiles les plus brillantes au travers. Leur longueur est très changeante, pouvant s'étaler jusqu'à la centaine de kilomètres : de même, leur largeur varie de quelques centaines de mètres (on parle alors d'arc auroral) à plusieurs dizaines de kilomètres ; enfin, leur durée varie de quelques minutes à quelques heures.

Les statistiques faites à partir des données du satellite de défense américain DMSP ont montré qu'au nord de la Norvège par exemple les particules précipitées sont le plus souvent d'énergie inférieure à 600 eV vers 20 heures locales. Elles excitent l'hydrogène des hautes altitudes - qui retourne à son état fondamental par des émissions non visibles -, et l'oxygène atomique, qui émet alors une lumière verte. Ce sont les aurores diffuses, dont l'origine est donc des précipitations intenses de faible énergie. En revanche, vers 21 heures et 6 heures locales, l'énergie incidente - typiquement 1 à 10 keV - permet de descendre plus bas dans l'atmosphère (jusqu'à 80 km). Les ions, atomes et molécules excités se dés excitent en émettant beaucoup de lumière visible : 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 ... C'est le phénomène d'aurore polaire discrète,

La dynamique des aurores est impressionnante, et impossible à rendre au seul moyen de photographies. Des tourbillons se créent en quelques dixièmes de secondes, se propagent sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres en l'espace de quelques secondes. Il existe une nomenclature des aurores, qui va jusqu'aux aurores noires, qui sont les zones du ciel entre deux arcs auroraux. Notons enfin que lors de forts événements solaires, les aurores peuvent s'étendre vers l'équateur. C'est ainsi qu'on a pu en voir du nord de la France dans la nuit du 6 au 7 avril 2000, en période de quasi maximum d'activité solaire.

Développement d'une aurore polaire



On voit les étoiles à travers l'aurore boréale

Ouèbographie

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 Bigore.

<http://www.nasa.gov/>

Le site européen de SOHO est :

<http://sohowww.estec.esa.nl/>

Il existe un autre merveilleux satellite d'observation du Soleil, YOHKOH :

<http://www.space.lockheed.com/SXT/homepage.html> (site américain)

<http://www.solar.isas.ac.jp/english> (site japonais)

La météorologie de l'espace

Pour l'ESOC, on peut aller consulter sur le Net :

<http://www.esoc.esa.de>

Les cartes de prévisions ionosphériques sont sur

<http://www.rcru.rl.ac.uk/iono/>

Le site d'arianespace :

<http://www.arianespace.com>

Celui de GOES est à :

<http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/>

<http://www.photovault.com/Link/Industry/ProcessOil/AlaskaPipeline.html>

Les sites web de météorologie spatiale sont :

Australie : <http://www.ips.gov.au>

Etat-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.su/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/>

Bibliographie

Le Soleil

L'astrophysique nucléaire, J. Audouze, collection Que Sais-je ?, PUF

Evolution stellaire et nucléosynthèse, H. Reeves, Gordon and Breach

Un article exprime sans ambiguïté la qualité des apports de SOHO dans la physique solaire : L'ère SOHO a commencé, par F. Baudin et S. Koutchmy, *Journal des astronomes français*, **53**, 10-17, 1997

Le Soleil et ses relations avec la Terre, K.R. Lang, éditions Springer, 1995, ISBN 3-540-59445-0 : un livre magnifiquement illustré, dont le Soleil est le sujet principal, traité de façon assez exhaustive.

Le Soleil en face, P. Lantos, édition Masson, 1997, ISBN 2-225-83054-1. Un petit livre scientifique (niveau DEUG de physique) écrit par l'un des maîtres du domaine en France. Complet mais hélas en noir et blanc

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, ed. Vuibert, ISBN 2-7117-5280-1, 1999 est certainement appelé à devenir l'une des références en langue française en géophysique.

Deux livres récents en Français présentent la Terre (et en particulier l'origine de son champ magnétique) :

La physique et la Terre, H.C. Nataf et J. Sommeria, Belin-CNRS éditions, 2000, ISBN 2-7011-2370-4

Géophysique et Géologie, L. Llyboutry, ed. Masson, Collection Enseignement des sciences de la Terre, 1998, ISBN 2 225 82922 5

L'aéronomie a longtemps été le parent pauvre de l'édition en langue française. Les choses évoluent rapidement, et on peut lire maintenant :

Aéronomie, physique et chimie de l'atmosphère, G. Kockarts, ed. De Boeck Université, ISBN 2-8041-3456-3, 2000

Ce livre est écrit par l'un des fondateurs de cette science, avec une très grande clarté.

A un niveau maîtrise de physique :

Du Soleil à la Terre, J. Liliensten et P.L. Blelly, ISBN 2 86883 467 1, Editions de la Physique (EdP sciences), 2000

Les ouvrages de planétologie sont nombreux, mais très peu d'entre eux explorent les aspects magnétique et ionosphérique. Citons

Le système solaire, T. Encrenaz, J.P. Bibring, et M. Blanc, Interédition/éditions du CNRS, 1987, ISBN 2-7296-0152-X

Une réédition corrigée serait en cours ...

Concernant les aurores polaires, un livre grand public en langue française est à mettre en exergue :

« Les aurores boréales ou les lumières mystérieuses », de Candace Savage, éditions du Trécarré, 1994, ISBN 2-89249-535-0.

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, depuis l'antiquité aux années 50.

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). Un livre montre bien les liens entre le Soleil et le climat, et les inconnues actuelles :

Histoire solaire et climatique, E. Nesme-Ribes et G. Thuiller, Belin, janvier 2000, ISBN 0993-4812

Un petit livre de la série Que sais-je est en quelques sortes un précurseur de la météorologie de l'espace :

« L'environnement spatial », J.C. Boudenot, Que Sais-je, ISBN 2 13 04 7271 0, 1995

Niveau maîtrise /DEA/ thèse, ce livre dresse un panorama des relations soleil – terre avec un point complet sur l'ionosphère et la thermosphère :

J. Liliensten et P.L. Blelly, Du Soleil à la Terre, aéronomie et météorologie de l'espace, collection Grenoble Sciences, EDP Sciences, ISBN 2 86883 467 1, janvier 2000

Pour un public plus large, sur le même sujet :

J. Liliensten et J. Bornarel, Sous les feux du Soleil : vers une météorologie de l'espace, collection Grenoble Sciences, EDP Sciences, ISBN 2 86883 540 6, novembre 2001