Vers une météorologie de l'espace

Jean Lilensten et Pierre Volcke

Une série d'éruptions solaires particulièrement intenses s'est produite en octobre 2003 et notre incapacité à en prévoir les conséquences (perturbation des télécommunications entre autres) illustre la nécessite de faire progresser cette branche nouvelle de l'astronomie appelée la météorologie de l'espace. Cet article s'attache à décrire les interactions du rayonnement électromagnétique et des particules solaires avec le champ magnétique et l'atmosphère terrestres et montre comment la météorologie de l'espace tente de quantifier et de prédire leurs implications dans les activités humaines spatiales et terrestres.

Le 28 octobre 2003, nos divers observatoires enregistraient un peu après 9 TU un événement solaire d'une amplitude rarement atteinte. Le flux de rayonnement X était brutalement multiplié par un facteur 1000, témoignant d'une éruption solaire de classe exceptionnelle. L'émission de particules associée à cette débauche de rayonnement fut à la hauteur : la vitesse des électrons et protons atteignait 2125 kilomètres par seconde, soit 7,25 millions de kilomètres par heure au niveau de la terre, alors qu'elle est typiquement de l'ordre de 600 à 700 km.s^{-1} lors d'éruptions classiques. Ce flux était dirigé vers la Terre.

L'orage magnétique, attendu dans l'après midi, commença avec deux heures d'avance, lorsque le nuage de particules solaires d'une densité environ 100 fois supérieure à celle des périodes calmes heurta la zone d'influence du champ magnétique terrestre, faisant reculer sa frontière sur près de la moitié de son éloignement habituel. Les perturbations du champ magnétique terrestre, d'ordinaire de l'ordre de quelques dizaines de nT sur un champ total variant de 30 000 nT à l'équateur à 60 000 nT aux pôles, furent multipliées par cent à haute latitude. A partir de 16 TU, une série d'aurores se développa depuis les hautes vers les basses latitudes, bientôt visibles au Nouveau Mexique ou dans le nord de la France.

Cet événement fut le premier d'une série qui dura trois jours. Nous n'avons pas su prédire les éruptions ni quantifier leurs conséquences. Il est étudié dans le cadre général d'une nouvelle branche de l'astronomie :
la météorologie de l'espace.

LE SOLEIL

Le spectre électromagnétique solaire

Le spectre solaire s'étend sur une large gamme de longueurs d'ondes, depuis le dixième de nanomètre jusqu'au mètre. Dans le visible, de 390 à 760 nm, il rayonne avec un maximum autour de 450 nm, c'est à dire dans le bleu-vert. Cette partie du spectre a été étudiée depuis le 19ème siècle. Néanmoins, la lumière visible a peu d'importance pour la météorologie de l'espace. Les énergies qui nous concernent se situent en effet dans la gamme de l'ultraviolet (100 à 390 nm) ou de l'extrême ultraviolet (20 à 100 nm).

Lorsque Planck, en 1901, présenta sa théorie du corps noir – dont le Soleil est un bon exemple dans le visible – il était loin de suspecter la présence d'un rayonnement intense dans la partie invisible. Mais en 1937, Saha montre que l'excitation de l'azote atmosphérique ne peut s'expliquer que par la présence de rayonnement UV en excès d'un facteur au moins égal à 10^6 par rapport au corps noir.

Cette prédiction sera confirmée par la mesure, en 1946, au cours des premières expériences à bord de fusées. Ce n'est qu'à la fin des années 70 que des spectres purent être mesurés dans des conditions solaires diverses. Leur variabilité s'avérait très grande, l'intensité de certaines raies pouvant être multipliées par un facteur 20.

L'incertitude sur ces flux est

grande, près de 100% à certaines longueurs d'ondes, en dépit des précautions apportées à la calibration et aux analyses. Là comme dans la plupart des branches de la physique solaire, c'est au satellite SOHO (Solar Heliospheric Observatory) que nous devons les résultats les plus récents (figure 1). Ses instruments de mesure du flux solaire nous ont permis de suivre en direct l'événement d'octobre 2003.

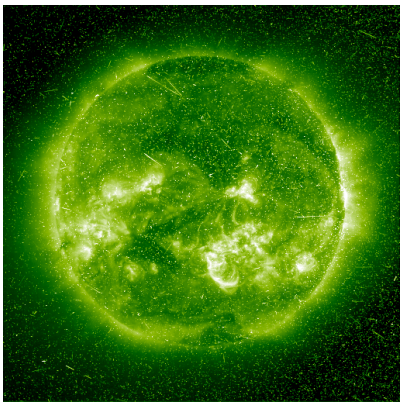

Figure 1 : Image du soleil dans l'extrême ultraviolet à 19,5 nm prise par EIT à bord de SOHO lors de l'événement du 28 octobre 2003. Les taches blanches sur le fond du ciel sont en réalité des impacts de protons sur le télescope. On distingue des régions solaires sombres : les trous coronaux. Des régions plus brillantes correspondent à des zones d'une grande dynamique. Ce sont des régions actives. (crédit : EIT-SOHO, ESA-NASA)

Vent solaire et éruptions

Outre le rayonnement électromagnétique, le Soleil produit un flux permanent de particules. Baptisé « vent solaire » par Parker dans les années 50, il est composé d'électrons, de 95% d'ions H^+, 5% d'ions He^+, et de traces d'autres ions, le tout étant électriquement neutre. Dans le plan de l'écliptique, au niveau de l'orbite de la Terre, sa vitesse moyenne est de 370 $km.s^{-1}$. Les récentes observations du satellite ULYSSE (ESA/NASA) ont montré que cette vitesse augmentait jusqu'à 750 $km.s^{-1}$ au dessus des trous coronaux (voir figure 1), où elle acquiert une grande stabilité. Au niveau de la terre, la concentration moyenne du vent solaire est d'environ 5 ions et 5 électrons par centimètre cube (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 concentration était divisée de moitié en s'approchant des pôles.

L'activité solaire

Le Soleil est le siège d'une « activité magnétique » très variable. Le champ magnétique solaire trouve probablement sa source dans une zone découverte récemment, la tachocline, interface entre la partie interne qui tourne d'un bloc, de façon rigide, et l'enveloppe solaire qui tourne avec des vitesses variables à la fois en profondeur et en latitude, qui constitue la zone convective.

Le champ magnétique, d'une intensité globale relativement faible (deux fois celui de la Terre), est hautement variable, passant en environ cinq ans d'un état bipolaire à une configuration où des pôles multiples sont présents sur l'étoile, puis dans les 5 à 6 années suivantes, retournant à la configuration bipolaire, mais avec une inversion des pôles. Un tel cycle dure 11 ans. Le cycle actuel, le 23ème depuis qu'ils sont comptés, a connu son inversion de champ en février 2003 et est dans sa phase de décroissance.

L'activité magnétique solaire engendre bien des conséquences. Le flux électromagnétique examiné ci-dessus, comme le vent solaire, sont plus intenses au milieu du cycle. On dit alors le soleil « actif ». En début de cycle, des taches sombres apparaissent à la surface du soleil (figure 2).

Leur durée de vie est de quelques jours à quelques dizaines de jours. A mesure que l'activité solaire croît, leur nombre augmente. Dans ces taches, le champ magnétique est jusqu'à un millier de fois plus élevé qu'à l'entour. La matière, sensible au champ magnétique, y est plus organisée ; les collisions sont moins fréquentes et la température décroît de 5800 K à 4000 K environ (figure 2).

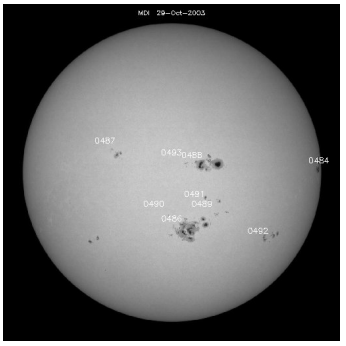

Figure 2 : Observation du soleil en H alpha le 29 octobre 2003. A cette longueur d'onde, on observe la surface (photosphère). Les taches sombres sont bien visibles. Les événements éruptifs des 28 et 29 octobre sont associés au groupe numéroté 486 (crédit DASOP-Observatoire de Paris Meudon)

Corrélativement, des phénomènes violents, sporadiques, éjectent de la matière énergétique rapide. Ce sont des éruptions, issues d'arcs pouvant atteindre une quarantaine de fois le diamètre de la Terre, ou des éjections plus haut dans la couronne solaire, qu'on qualifie « de masse coronale » (figure 3). Eruptions, éjections de masse coronales ou taches solaires sont les *effets distincts*, ou les *témoins* de la variabilité magnétique du soleil et non sa *cause*.

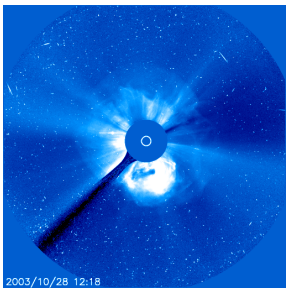

Figure 3 : L'éjection de masse coronale du 28 octobre 2003. L'instrument est un coronographe, qui cache le soleil pour mieux distinguer son atmosphère. Le cache est visible au centre, et la taille apparente du soleil est donnée par le cercle blanc. La trace sombre sur la gauche est un effet instrumental (crédit LASCO-SOHO, ESA-NASA)

LA HAUTE ATMOSPHERE TERRESTRE

L'effet du rayonnement : ionosphère diurne et thermosphère

Les principaux composants de la haute atmosphère terrestre sont O_2 et N_2 entre 80 et 105 km. Au-dessus de 200 km et jusque vers 600 km, l'oxygène atomique devient le composant majoritaire, les minoritaires étant l'hydrogène, l'hélium, l'argon et l'azote atomique. Les concentrations totales typiques sont 10^{15} particules.m^{-3} à 400 km et 10^{20} particules.m^{-3} à 80 km. La température est d'environ 200 K à 90 km et augmente jusqu'à 1000 K environ à 400 km. C'est pourquoi on qualifie cette partie d'atmosphère neutre de thermosphère. La source de chauffage est le rayonnement solaire énergétique.

Les photons extrême UV décrits ci-dessus possèdent des énergies supérieures aux seuils d'ionisation des différents constituants atmosphériques, qui sont tous de l'ordre de 10 eV. C'est à dire qu'ils sont susceptibles d'exciter, de dissocier ou d'ioniser l'atmosphère, qui constitue un véritable filtre pour ce rayonnement.
La partie ionisée de l'atmosphère est appelée ionosphère. Elle est globalement neutre (autant d'ions que d'électrons) et des milliers à millions de fois moins dense que le gaz neutre ambiant. L'ionosphère est mélangée à la thermosphère pour former la haute atmosphère, comme l'huile et le vinaigre dans une sauce de salade.

L'effet lointain des particules : la magnétosphère

En l'absence de vent solaire, l'environnement magnétique de la Terre aurait à peu près la forme d'un dipôle. L'interaction du champ géomagnétique et du vent solaire peut être comparée à celle d'un vent supersonique (Mach 8) sur une voiture : une onde de choc se forme à l'avant (à 15 rayons terrestres environ) et force les particules du vent solaire à épouser la forme du champ géomagnétique. Peu de particules sont capables de 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 a descendu jusqu'à 6 en octobre 2003. L'intérieur de cette cavité s'appelle la magnétosphère. Elle est comprimée vers la Terre côté jour par la pression du vent solaire, et s'étend en une longue queue étirée par le vent solaire côté nuit.

Cependant, 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. Côté solaire, des entrées directes sont possibles selon la configuration du champ magnétique porté par le vent solaire.

De façon extrêmement simplifiée, côté jour, le vent solaire, en approchant de la Terre, « voit » le champ géomagnétique qui, selon les lois d'Ampère, crée une séparation de charges. Davantage d'ions dérivent le long de la magnétopause côté Ouest, et davantage d'électrons

côté Est, engendrant un champ électrique qui traverse toute la magnétosphère côté nuit.
Les particules qui se retrouvent dans la magnétosphère subissent une forte accélération. 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 tore autour de la planète, la ceinture de Van Allen puis, au gré des collisions, de suivre une ligne du champ magnétique locale pour être précipités vers l'atmosphère.

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 où se concentrent les particules issues du vent solaire tracent sur la Terre deux ovales appelés ovale auroraux, typiquement situé entre 65° et 75° de latitudes magnétiques nord et sud (figure 4). Ces deux ovales existent en permanence, car le vent solaire souffle de façon continue. En cas de perturbation solaire, il s'étend vers les basses latitudes (figure 4).

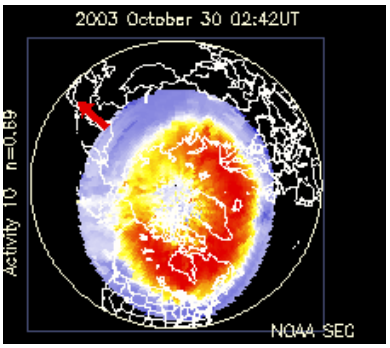

Figure 4 : Ovale auroral nord, le 30 octobre 2003 dans l'UV. Les zones rouges correspondent à des précipitations intenses de particules. L'ovale est centré autour du pôle magnétique (crédit Space Environment Center, NOAA)

L'ionosphère aurorale

Les particules précipitées vont heurter le mélange peu dense (n'oublions pas que nous sommes aux altitudes de vol de la navette spatiale) de gaz neutre et ionisé. Certaines collisions ne sont que de simples collisions élastiques, qui renvoient les particules vers l'autre hémisphère. D'autres collisions peuvent chauffer les électrons ambiants : on a observé des températures électroniques de 9000 K à 300 km en octobre 2003.

Les collisions peuvent également exciter et/ou ioniser les particules, qui peuvent retourner à l'état fondamental en émettant des ondes électromagnétiques, parfois dans le domaine visible : c'est le mécanisme des aurores polaires (voir « Accélération et rayonnement dans les aurores boréales, R. Potelette, N. Dubouloz et M. Malingre, Images de la physique, 2000).

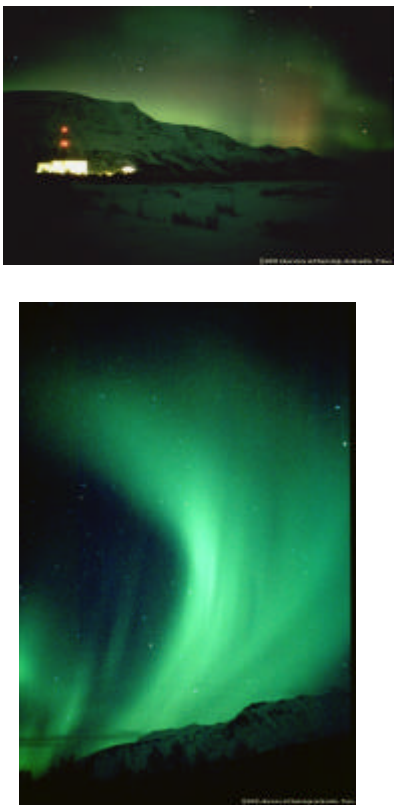

Figure 5 : Aurores polaires. Image du haut : au dessus d'un radar scientifique d'observation de l'ionosphère (EISCAT).

On ne peut les voir que pendant la nuit car leur lumière est si ténue qu'elle est écrasée par celle du jour, et même par celle de la pleine lune : on distingue les étoiles les plus brillantes au travers (figure 5).

Comme elles se produisent au dessus de 80 km, il faut également un ciel clair. Ces conditions sont réunies en particulier en hiver, par les grands froids secs, ce qui les a fait associer à tort avec l'arrivée du froid. Leur étendue spatiale est très variable, jusqu'à des centaines 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.
La dynamique des aurores est impressionnante, parce que la dynamique des éruptions solaires l'est, 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 quelques secondes. Lors de forts évènements solaires, les aurores peuvent s'étendre vers l'équateur. C'est ainsi qu'on a pu en voir du nord de la France en octobre 2003.

LA METEOROLOGIE DE L'ESPACE

Alain Hilgers (ESTEC), a proposé de nommer « ecospace » l'écosystème qui inclue l'environnement spatial de la terre. Cette notion a le grande mérite de souligner l'unité de notre environnement.
La météorologie de l'espace se préoccupe des effets de l'activité solaire sur l'écospace. Ils sont de plusieurs ordres.

Certains influent sur les conditions naturelles de vie (encadré 1) : il semble que les basses couchent atmosphériques soient liées à la thermosphère et à la magnétosphère par plusieurs phénomènes. Deux mécanismes au moins suscitent des recherches très approfondies : la découverte dans les années 90 d'éclairs bleus et rouges créant des décharges électriques entre le sommet des nuages d'orage et la basse ionosphère, et une anticorrélation entre l'activité solaire et la couverture nuageuse.
Ainsi, la météorologie de l'espace pourrait bien être fortement liée à la météorologie classique.

Certains effets influencent notre environnement technologique.
La magnétosphère est le siège de nombreux courants électriques qui induisent des courants dans les sols conducteurs. Ces derniers, lentement variables, sont considérés comme continus par les transformateurs électriques, et engendrent des pannes. Le 30 Octobre 2003, la ville de Malmö en Suède s'est ainsi trouvée privée d'électricité pendant 20 à 50 minutes, affectant 50 000 personnes. Ils accélèrent également la corrosion des pipe-lines en augmentant la différence de potentiel avec le sol. L'environnement électromagnétique perturbé engendre des problèmes de communications à toutes les échelles, des téléphones cellulaires aux communications sol – satellites.
Le chauffage atmosphérique augmente la friction sur les satellites, modifiant leurs orbites. Il faut pratiquer des manœuvres pour retrouver les orbites voulues, réduisant la vie des satellites.
Plus dangereuse est la perte de localisation des débris spatiaux, poussières interstellaires, météores, météorites, ou étages de fusées, de satellites défunts, de morceaux d'engins spatiaux divers, pour la même raison de chauffage atmosphérique. Il est devenu nécessaire de maintenir ces débris sous haute surveillance.
C'est possible pour ceux dont la section efficace excède dix centimètres et qui sont au nombre d'environ 8500, face aux 110 000 débris dont la taille va de 1 à 10 centimètres. Au total, plus de 2 millions de kilogrammes de déchets 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 croît de façon exponentielle avec le temps. Or, en cas d'orage magnétique, les débris sont emportés par l'atmosphère, et il faut plusieurs heures pour en retrouver la trace.
Les satellites eux-mêmes sont exposés aux divers courants électriques de la magnétosphère, dont l'intensité varie avec l'activité solaire. Ces courants électriques dégradent les panneaux solaires ou divers instruments. Ils peuvent en outre corrompre la programmation des ordinateurs de bord, ce qui peut engendrer la perte du satellite si le contrôle d'attitude est affecté.
Hors de la magnétosphère, les satellites sont exposés au vent solaire, généralement peu agressif, mais qui le devient lorsque le soleil expulse des protons dans des énergies de l'ordre du méga électronvolt. Ainsi, en Octobre 2003, on a compté une trentaine de pannes satellitaires dont trois

définitives.

Enfin, l'activité solaire a un effet biologique, à travers des modifications d'ADN des spationautes comme des personnels aériens navigants.

Le but de la météorologie de l'espace est de prédire de façon quantitative l'amplitude des sautes solaires, du vent solaire, des perturbations sur la magnétosphère, sur l'atmosphère, sur les courants de sol, et toutes les implications technologiques qui s'y rattachent … Un vaste projet basé sur une physique et des mesures complexes, que les équipes impliquées dans la discipline voudraient voir avancer en quelques années !

Ecadré 1. Des pistes pour les mesures physiques

La météorologie de l'espace impose trois nécessités pour la mesure : une couverture globale de la planète, des mesures en temps réel et enfin une intercalibration précise des instruments. Ces contraintes sont très sévères et augmentent considérablement les coûts. La conséquence logique est l'internationalisation des projets.

Quels instruments répondent d'ores et déjà à ces points ? Au sol, les ionosondes qui mesurent l'ionosphère en temps réel sont peu chères. Cependant, si elles sont répandues, il en existe moins d'une dizaine en Europe connectées sur réseau. Surtout, leurs intercalibration n'a jamais été réalisée. Nous ne pouvons compter à l'heure actuelle que sur les stations de système de positionnement global (GLONASS russe, GPS américain et bientôt Galileo européen). Nous disposons d'un réseau de stations au sol dont la position est parfaitement connue, qui permet de déduire le contenu électronique total rencontré par l'onde sur son chemin optique. C'est un paramètre important de traceur ionosphérique, essentiel pour les applications en télécommunication.

Un faible nombre de satellites sert à notre propos. SOHO en tout premier lieu, qui a encore probablement deux années de vie devant lui. Il existe aussi des satellites de mesure du vent solaire, des satellites magnétosphériques telle la grappe CLUSTER. Pour le futur, les agences travaillent sur International Living With a Star, imaginé par la NASA bientôt rejointe par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Il comprend des satellites d'observation du Soleil depuis plusieurs points de l'espace, des constellations de satellites magnétosphériques, ionosphériques et thermosphériques dont la couverture spatiale serait planétaire. Il s'agit d'un projet scientifique : le retour industriel sur investissements attendra que nous ayons une vue plus précise de l'écospace.

Pour en savoir plus :

BIBLIOGRAPHIE

J. Lilensten 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

J. Lilensten 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

Le Soleil et ses relations avec la Terre, K.R. Lang, éditions Springer, 1995, ISBN 3-540-59445-0

Le Soleil en face, P. Lantos, édition Masson, 1997, ISBN 2-225-83054-1

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

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

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