

La météorologie de l'espace

Jean Lilensten et Pierre-Louis Blelly

Jean Lilensten est chargé de recherche (CNRS) au Laboratoire de Planétologie de Grenoble (Université Joseph Fourier / CNRS).

Pierre-Louis Blelly est chargé de recherche (CNRS) au Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements à Toulouse (laboratoire propre du CNRS)

Les événements qui se sont produits au Québec en janvier 1998 sont révélateurs de la vulnérabilité de notre société face aux problèmes environnementaux et apportent une lumière nouvelle sur la manière dont nous devons concevoir la météorologie dans le prochain siècle. Le scénario qui s'est déroulé méthodiquement en janvier n'a rien à envier à celui d'un film catastrophe. En effet, tout commence par l'annonce, banale à cette époque de l'année, de la rencontre d'un front froid polaire et d'un front chaud, annonciateur de pluies verglaçantes. Cependant, l'ampleur et la durée du phénomène météorologique classique entraînent rapidement une paralysie du réseau électrique de Québec. Le 9 janvier, la situation se dégrade considérablement et des quatre lignes qui alimentent normalement la belle province, une seule résiste. On est passé à deux doigts du chaos...

Une analyse précise des faits montre que le phénomène climatique invoqué n'est pas seul responsable et qu'il convient d'aborder cette question dans un cadre plus large qui englobe la Terre, son environnement spatial proche et le Soleil. En effet, un hasard malencontreux a voulu que de la matière éjectée de notre étoile arrive au niveau de l'orbite Terre à ce moment-là et déclenche un orage magnétique, perturbant les systèmes de distribution d'électricité. Nous venons de faire un bond dans la météorologie du 21^{ème} siècle qui intègre une discipline en émergence - la météorologie de l'espace - dont la définition la plus commune est la prédiction de l'impact des activités solaire et géomagnétique sur l'ensemble des activités humaines.

Les phénomènes physiques invoqués sont à peu près connus : le Soleil émet en permanence de l'énergie sous forme de rayonnement et de particules. Le rayonnement ultraviolet donne naissance à l'ionosphère diurne dans la haute atmosphère terrestre, au dessus d'environ 80 km (voir figure 1). L'interaction des particules avec le champ magnétique terrestre génère la magnétosphère (voir figure 2). Dans ces régions (magnétosphère et ionosphère) se propagent des courants de direction et d'amplitudes diverses, qui engendrent des champs électriques et des perturbations du champ magnétique locales. Mais lors d'éruptions solaires, l'apport d'énergie sous la forme de vent de particules peut atteindre 10^{26} J en quelques minutes, équivalent à la production de trente millions de centrales électriques de mille mégawatts fonctionnant pendant cent ans ! Les effets deviennent sensibles sur l'ensemble du globe : on parle joliment d'orage magnétique. Or, si cela a toujours existé, troublant les pigeons voyageurs il y a déjà plusieurs siècles, notre ère technologique nous y rend particulièrement sensibles.

Par exemple, une injection massive de particules énergétiques chargées dans la magnétosphère engendre des décharges électriques sur les surfaces conductrices des satellites. Si les blindages de protection sont insuffisants, des composants électroniques peuvent être affectés. La miniaturisation entraîne une sensibilité accrue vis à vis de ces phénomènes. Des panneaux solaires, l'électronique de commande, etc. peuvent être endommagés ou détruits. Ainsi, en janvier 1994, deux satellites de télécommunication canadiens ont-ils cessé de fonctionner, l'un pendant huit heures et l'autre pendant six mois, parce qu'ils avaient subi de telles décharges électrostatiques dans leurs circuits de contrôle d'attitude. Et l'on commence à prendre conscience que la même menace pèse aussi sur les fusées au cours de la phase de décollage.

L'arrivée massive d'énergie modifie l'équilibre de l'atmosphère : un rayonnement intense l'échauffe et provoque son expansion vers le haut de telle sorte que la concentration peut doubler au-dessus de 300 km. La conséquence est un accroissement de la force de traînée pour les satellites en orbites basses : ils sont freinés. Cela a été observé pendant dix-sept jours, sur plus de 1400 satellites après le déclenchement d'un orage en mars 1989. Et l'on pourra aussi citer l'exemple de la station spatiale américaine Skylab, rentrée prématurément dans l'atmosphère en juillet 1979, quelque part dans l'Océan Indien, non loin de l'Australie, en un point qui aujourd'hui encore n'aurait pu être déterminé à l'avance.

D'autres aspects doivent aussi être considérés. Nos sociétés, en particulier, sont fortement dépendantes des moyens de communications qui utilisent les ondes électromagnétiques dont la propagation est affectée par toute altération de l'ionosphère. On sait aussi que la corrosion des pipelines est accrue par les courants électriques qui s'y propagent lors des orages magnétiques. Les perturbations les plus graves concernent cependant la fabrication et distribution de l'électricité. 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. Lors d'orages magnétiques, les courants parasites se propagent jusqu'aux transformateurs avec une intensité qui peut dépasser les capacités de régulation et faire, comme en témoigne l'exemple québécois, disjoncter le réseau.

Ajoutons que ces courants sont extrêmement variables en comparaison des fréquences pour lesquelles les transformateurs sont conçus. Leur dissipation ne peut se faire dans ces conditions que par échauffement. Lors d'un orage magnétique en 1992, on a relevé ainsi un échauffement de 60 °C à 175 °C sur un transformateur d'une centrale nucléaire aux Etats-Unis. Mais plus graves encore sont les menaces que les colères du Soleil font directement peser sur la santé. Le rayonnement UV et les particules énergétiques peuvent modifier l'ADN des astronautes et initier des cancers, ou provoquer une stérilité. Les doses de radiation peuvent même se révéler létales. Et l'inquiétude est grande aujourd'hui concernant la santé des mécanos de l'espace appelés à assembler la station internationale dans les années à venir, en plein maximum d'activité solaire. On commence également à s'émouvoir des risques du même ordre encourus par les personnels navigants des compagnies aériennes. Les doses de rayonnement qu'ils reçoivent lors des éruptions sont certes faibles à chaque voyage, mais leur effet est cumulatif.

Le risque financier doit également être considéré. Par exemple, le 13 mars 1989, en 90 secondes, un orage magnétique a causé la fonte de transformateurs au Québec et aux Etats-Unis, privant d'électricité 6 millions d'abonnés pendant 9 heures. La facture de l'incident s'est élevée entre 3 et 6 milliards de dollars, du même ordre qu'après un cyclone ou un tremblement de Terre. Selon les chiffres produits lors du premier atelier de travail sur la météorologie de l'espace, tenu en novembre 1998 à l'Agence Spatiale Européenne, de 1989 à 1998, le lancement, la mise en orbite et la vie opérationnelle des satellites ont permis aux sociétés d'assurances de dégager un bénéfice de 1,3 milliards de dollars. Le remboursement par ces compagnies d'un ou deux satellites pourrait alors être envisageable. Mais la destruction de plusieurs dizaines, voire centaines d'entre eux – une éventualité qui ne peut être exclue à l'heure actuelle – conduirait à une faillite planétaire, dans laquelle serait entraîné l'ensemble des grandes banques mondiales qui sont leurs actionnaires.

Ces trois dernières décennies, la branche de l'astronomie qui s'intéresse à ces phénomènes a fait des progrès considérables. Même si bien des points restent obscurs, nous savons en gros expliquer les observations. Cependant, il nous faut aujourd'hui passer de la *compréhension* à la *prédiction*, et cela exige un saut quantitatif considérable de nos connaissances, ainsi qu'un important changement d'état d'esprit. Nous en sommes à peu près au niveau de la météorologie classique au début du siècle qui savait expliquer les cyclones mais non les prédire ! Quelles difficultés nous attendent ?

Les premières – peut être les plus faciles à résoudre – sont d'ordre physique. L'ultraviolet est excessivement mal connu. Tout notre savoir repose sur les mesures de deux satellites (Dynamics Explorer) dans les années 80. Malheureusement, leur résolution et leur étalonnage laissent à désirer ! La difficulté réside dans le fait que ce rayonnement est si énergétique qu'il brûle les appareils de mesure. De plus, l'interaction du rayonnement avec l'atmosphère est immédiate. Ainsi, lorsqu'on mesure les photons (8 minutes après leur émission), l'effet se fait déjà sentir. On ne peut donc pas envoyer des messages d'alerte sur une observation en temps réel: il faut prévoir. Or, il semble qu'il n'existe pas deux éruptions solaires identiques.

Les éjections de masse de la couronne solaire restent elles aussi mal connues. Il en va de même des accélérations, du stockage et de la libération d'énergie dans la magnétosphère, des vents de la haute atmosphère lors des orages magnétiques, ou du lien entre les hautes altitudes et le climat global de la planète. Là, la difficulté peut se révéler moindre dans la mesure où les particules mettent trois jours de plus que la lumière à arriver sur terre. Mais nous sommes très loin de pouvoir chiffrer la quantité d'énergie attendue, et moins encore les courants qui viendront s'ajouter dans nos fils électriques !

Une seconde difficulté, que nous n'avons pas apprise à gérer, est de faire collaborer des corps de métiers très différents (électriciens, assureurs, astronomes ...). Le simple fait de trouver un langage commun se révèle ardu ! De là à partager des connaissances communes ... Par ailleurs, si les chercheurs sont conscients des problèmes qui se posent et vont se poser de manière accrue dans le futur proche, ce n'est pas le cas de l'ensemble des utilisateurs potentiels (militaires, assurances et banques, agences de l'énergie, de l'espace ou des télécommunications), qui voient mal pourquoi il faudrait mettre la main au porte-monnaie ! Heureusement, des synergies se développent, et des moyens sont d'ores et déjà mis en place dans cette branche de la géophysique tant aux Etats-Unis qu'en Europe. En France, de nombreux laboratoires du CNRS, des universités et d'autres organismes de recherche, comme l'ONERA, en collaboration avec le CNES, ont mis sur pied le Programme National Soleil-Terre, dont l'une des thématiques est entièrement dévolue à la météorologie de l'espace.

Enfin, notre profession de chercheurs s'accommode mal de l'action dans l'urgence. Or, les enjeux sont si gros qu'une véritable bataille planétaire se joue pour le leadership de cette science émergente, et des possibles marchés juteux qu'elle pourrait dégager (qu'on pense aux succès commerciaux de Météo-France). Les USA sont partis les premiers dans la course technologique et médiatique : construction d'un centre de prévision dans le Colorado, annonces spectaculaires de futures éruptions par la NASA ... En Europe, nous en sommes à l'heure du débat de politique scientifique : devons nous collaborer avec les USA, nous poser en partenaire ou en concurrent ? Sommes-nous certains, si nous n'agissons pas rapidement, que les bulletins et les données satellites américains resteront gratuits, comme c'est le cas aujourd'hui ? Ainsi, la réflexion de recherche fondamentale pure et d'applications technologiques s'accompagne-t-elle d'une réflexion socio-économique. La météorologie de l'espace constitue certainement l'un des grands chantiers de la prochaine décennie.

J.L. et P.L.B

Bibliographie :

Articles grand public :

La Recherche, n° 217, Janvier 1990, vol 21, pages 10 à 19 : Le Soleil 24 h sur 24, par S. Koutchmy et J.C. Vial.

Livres :

Le Soleil, Pierre Lantos, collection Que sais-je ?

Le Soleil et ses relations avec la Terre, Kenneth R. Lang, ISBN 3-540-59445-0, Springer Verlag

Du Soleil à la Terre : Aéronomie et météorologie de l'espace, J. Liliensten et P.L. Bletly, Collection Grenoble-Sciences, Presses Universitaires de Grenoble, à paraître en avril 1999.

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

Articles scientifiques de revues à rapporteurs :

Un article de compilation des efforts de mesure et de modélisation du flux solaire UV peut être trouvé dans : Recent solar Extreme Ultraviolet Irradiance observations and modeling : a review, par W.K. Tobiska, dans *Journal of Geophysical Research*, vol **98**, 1996, pages 18879-18893. On trouvera dans cet article une bibliographie (presque) exhaustive sur les efforts précédents.

Le traitement mathématique des relations vent solaire / magnétosphère, par l'un des plus grands noms de la recherche magnétosphérique, peut être trouvé dans :

Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere, S.I. Akasofu, *Space Science Reviews*, vol 28, pages 121-190, 1981.

Enfin, sur les sous-orages :

Response of dayside net downward field aligned current to changes in the interplanetary magnetic field and to substorm perturbations, Rostoker, G., M. Mareschal and J.C. Samson, *J. Geoph. Res.*, **87**, 3489, 1982

L'article le plus complet sur l'équilibre énergétique de la population électronique est : « Electron Temperature in the F region of the ionosphere : theory and observations », par R.W. Schunk et A.F. Nagy, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 355-399, 1978.

Sites internet :

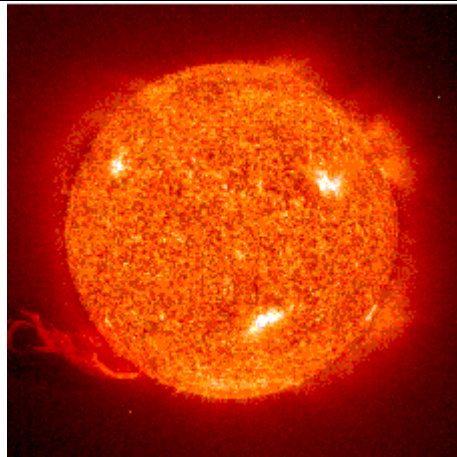
Les sites internet à consulter sont <http://sohowww.nascom.nasa.gov/> pour les résultats de SOHO, et <http://www.space.lockheed.com/SXT/homepage.html> pour ceux de YOHKOH.

<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. Les prévisions de l'activité solaires sont sur <http://www.obsmpm.fr/departement/dasop/previ/w3/previ.html>

Un site consacré à la magnétosphère et à l'ovale auroral est d'un intérêt particulier. Il s'agit de <http://www.irf.se/> sur lequel des données de satellites (incluant des images de l'ovale) sont montrées en temps quasi-réel !

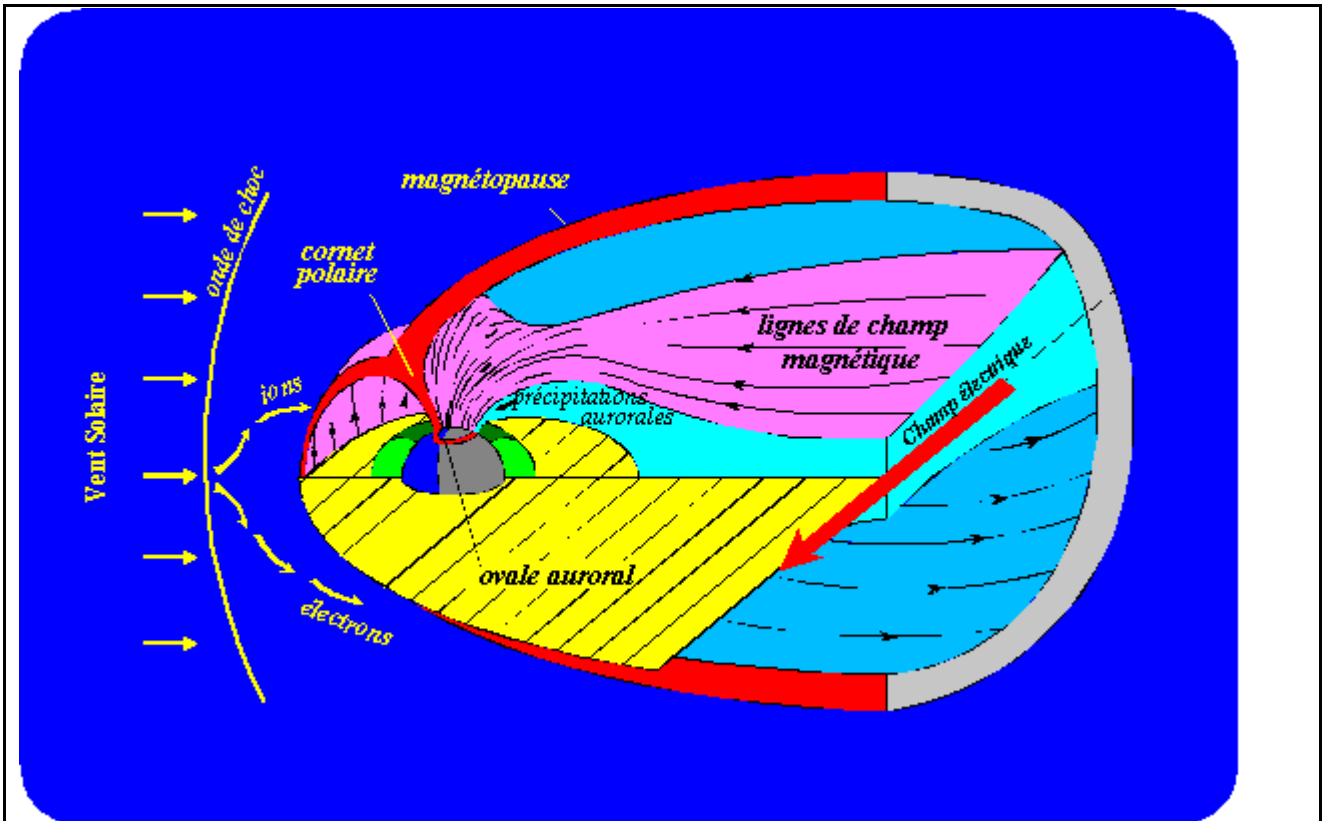
Sur la toile, on peut trouver facilement de splendides photographies ou animations d'aurores. On y trouve également des descriptifs et une nomenclature qui sortent de l'objet de cet article. Citons : <http://beatles.imv.uit.no/english/science/publicat/waynorth/wn1/contents.htm> ; <http://snake.irf.se/> ; <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/>

LE cite à consulter sur la toile est celui de la NASA : <http://www.nasa.gov/>. Prévoir plusieurs heures de plaisir !



Au regard de la météorologie de l'espace, le Soleil est source d'énergie au travers du rayonnement ultraviolet (photons) et du vent solaire (particules). Le rayonnement ultraviolet atteint notre planète après un voyage de 8 minutes. Bien que permanent, il varie fortement avec l'activité solaire, contrairement au rayonnement visible. Sa composante la moins énergétique est filtrée efficacement par la couche d'ozone vers 25 km d'altitude. Plus vigoureux, l'extrême ultraviolet est pour sa part stoppé au-dessus de 80 km. Son énergie sert principalement à exciter et chauffer les constituants atmosphériques qu'il cogne. Il se forme alors une région, la thermosphère, de concentration au moins dix millions de fois plus ténue que l'air que nous respirons, où la température croît avec l'altitude pour atteindre environ 1000 K vers 300 km. L'extrême ultraviolet a aussi un pouvoir ionisant à l'origine de la formation d'une couche conductrice dans la haute atmosphère : l'ionosphère.

Figure 1



Le vent solaire est constitué de particules chargées, principalement des électrons et des protons. Il est permanent, mais hautement variable lors d'éruptions solaires : sa vitesse moyenne de 400 km/s peut ainsi doubler, de même que sa concentration, qui est en moyenne de 5 particules par cm^3 au niveau de la Terre.

Son interaction avec l'environnement terrestre est fortement contrôlée par la présence de notre champ géomagnétique. A partir d'une dizaine de rayons terrestre en amont de notre planète, celui-ci dévie les ions vers l'aube (côté est) et les électrons vers le crépuscule (côté ouest) créant la magnétopause, limite des domaines d'influence respectifs du vent solaire et du champ magnétique terrestre (magnétosphère). En plus de courants surfaciques, la séparation de charge entraîne l'apparition d'un champ électrique qui traverse la magnétosphère d'est en ouest. Les courants qu'il engendre, dont l'intensité varie avec celle du vent solaire, affectent l'ensemble de notre planète.

Figure 2



Au voisinage des pôles magnétiques, les lignes de forces du champ magnétique terrestre sont ouvertes sur l'espace interplanétaire et offrent au vent solaire un accès direct à la haute atmosphère. La magnétopause elle-même se révèle quelque peu poreuse. Les particules du vent solaire y diffusent. Sous l'effet conjugué des champs magnétique, d'origine terrestre, et électrique, d'origine solaire, celles-ci finissent par se déposer dans les régions de séparation entre les lignes purement internes à la magnétosphère et les lignes ouvertes à haute latitude magnétique, le long d'une courbe située à environ 65° de latitude, au nord comme au sud, appelée «ovale auroral ». La face avant de la magnétopause peut également devenir perméable aux particules solaires selon l'orientation du champ magnétique qu'elles-mêmes transportent : quand il est impossible aux particules de le différentier de celui de la Terre, elles accèdent directement à la magnétosphère.

Quel que soit leur parcours, ces particules vont in fine atteindre l'atmosphère où, conduites par les lignes de force du champ magnétique, elles vont se concentrer aux hautes latitudes. L'effet le plus spectaculaire en sera l'apparition d'aurores polaires.

Figure 3