

FORMATION DES PERSONNES-RESSOURCES EN SCIENCE ET TECHNOLOGIE

LES AURORES BORÉALES

Pierre Lacombe

Astronome, directeur du Planétarium de Montréal



Source : www.alertes-meteo.com

DOCUMENT DE TRAVAIL

©2005 - Planétarium de Montréal. Tous droits réservés.

Les aurores boréales

« ...Cet obscur clarté qui tombe des étoiles
Enfin avec le flux nous fait voir trente voiles; [...] »
Corneille, *Le Cid*, Don Rodrigue, Acte IV, scène III,.

Surprises!

Nuit du 12 au 13 mars 1989, à Varennes au Québec. Soudainement, vers 2 h 45 du matin, le bureau de Léonard Bolduc, chercheur à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ), est plongé dans le noir. Le chercheur raconte : « En moins d'une minute, sept compensateurs conçus pour protéger l'équipement de transport d'électricité ont lâché entre Chibougamau et La Vérendrye » (1). Le réseau électrique s'effondre et tout le Québec est plongé dans le noir. La panne durera plus de neuf heures et touchera plus de six millions d'abonnés.

M. Bolduc quitte alors son bureau et observe, au-dessus de Montréal, « [...] une magnifique aurore boréale cramoisie qui se déployait en vastes entonnoirs » (1). Un violent orage magnétique était en cours.

Gloires aurorales

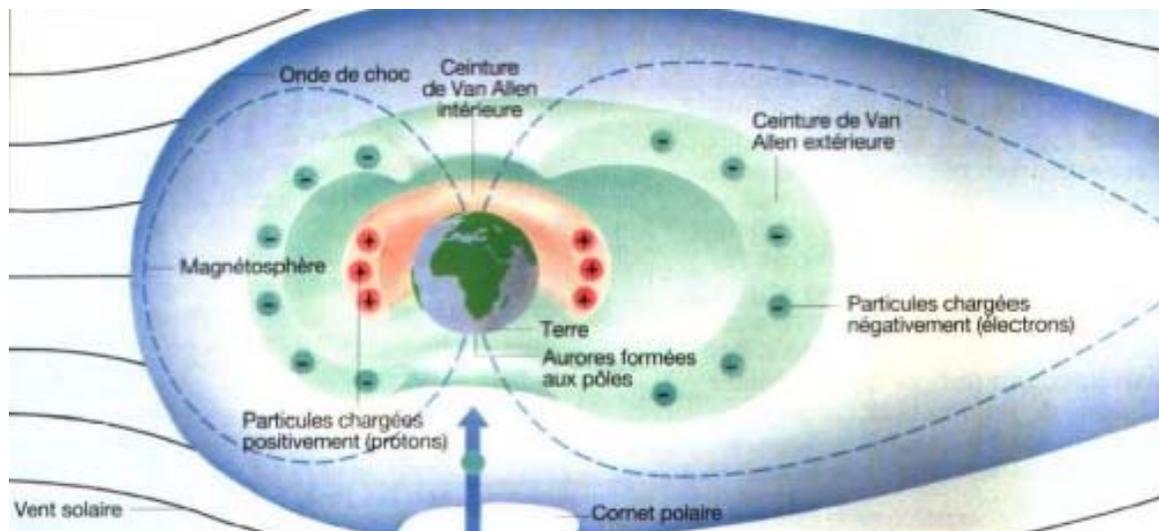
Le phénomène des aurores polaires tire son origine du Soleil, ou plus exactement du vent solaire. Bien que l'on considère que sous plusieurs aspects, le Soleil est une source de rayonnement stable et régulier, sa surface est constamment agitée de turbulences.

Le Soleil expulse ou « crache » en permanence, et ce, dans toutes les directions, un flux continu de particules chargées (électrons et protons). Ce jet de matière électriquement neutre que l'on appelle vent solaire est soufflé dans l'espace et voyage à une vitesse moyenne de 370 km/s (ou environ 1,3 million de kilomètres à l'heure!). Lorsque l'activité solaire est importante, l'intensité du vent est variable et souffle alors en bourrasque dans l'espace.

Deux ou trois jours après avoir quitté le Soleil, les particules du vent solaire arrivent près de la Terre. À 65 000 km de notre planète, ces particules se butent au champ magnétique terrestre

(1) SICOTTE, Vincent. « Tempêtes solaires : ça va chauffer! », 1999, *Québec Science*, vol. 38, numéro 2, octobre 1999, p. 12-13.

qui les fait dévier loin de la surface de la planète. Ce bouclier magnétique n'arrête pas le vent solaire. Il en dévie la plus grande partie au-delà de la Terre et le reste, à l'intérieur du champ magnétique terrestre. Les particules chargées (ce sont surtout les électrons qui nous intéressent ici) qui se déversent alors dans la magnétosphère terrestre sont entraînées vers la Terre suivant les lignes de force du champ magnétique. Elles emmagasinent alors beaucoup d'énergie et s'accumulent dans deux ceintures en forme d'anneaux entourant l'équateur magnétique de la Terre, appelées les ceintures de Van Allen, et situées à environ 25 000 km au-dessus de la surface terrestre. Les ceintures de Van Allen déversent ensuite leur trop-plein de particules chargées dans l'atmosphère terrestre près des pôles magnétiques Nord et Sud, ce qui produit alors les spectaculaires aurores polaires (nommées aurores boréales pour l'hémisphère Nord et aurores australes pour l'hémisphère Sud).



Source : mp01.free.fr/aurores2/Image2.jpg

Les particules chargées, en particulier les électrons, entrent en collision avec les molécules et les atomes de la haute atmosphère (surtout constituée d'atomes d'oxygène et de molécules d'azote) qui émettent à leur tour des couleurs chatoyantes : du vert et du rouge pour l'oxygène atomique, du bleu-violet et du rose pour le diazote.

Selon les conditions, les aurores deviennent visibles à des altitudes variant de 400 km à 1 000 km, ce qui forme la partie supérieure des rideaux de lumière. À mesure que les électrons tombent en cascade dans l'ionosphère, la lueur demeure visible sur plusieurs centaines de kilomètres. Vers 100 km d'altitude, la lueur s'éteint, la densité de l'atmosphère devenant telle à cette altitude que les collisions entre les atomes et les molécules de gaz sont trop nombreuses et trop rapides pour qu'il y ait émission de lumière.

Comme le soulignent de nombreux auteurs, les aurores ne bougent pas! Les atomes et les molécules de l'ionosphère qui émettent de la lumière sont essentiellement immobiles. Ce sont les électrons, arrivant en cascade de la magnétosphère, qui créent les mouvements ondulatoires des aurores.

Les aurores polaires se produisent essentiellement dans une mince bande elliptique d'environ 4 000 km de diamètre et centrée sur les pôles magnétiques : c'est l'ovale auroral. Dans l'hémisphère Nord, le centre de l'ovale auroral est situé au nord-ouest du Groenland. Les aurores sont toujours présentes au-dessus des deux hémisphères Nord et Sud. À toute heure du jour ou de la nuit, chaque jour de l'année, un drapé lumineux vert fluorescent se tortille et danse dans le ciel. Malheureusement, la majeure partie de l'activité aurorale se déroule loin des grands centres urbains. Par contre, une personne qui se trouve, pour l'hémisphère Nord, dans le nord de l'Alaska, du Canada, de la Norvège ou de la Russie, peut observer une aurore boréale pratiquement chaque fois que le ciel nocturne est dégagé (et sans Lune), de l'automne au printemps. Pendant l'été, la lumière persistante du Soleil de minuit ne permet pas d'observer les aurores.

Mythes et science

Comme le souligne l'auteure du livre à succès sur les aurores boréales, Candace Sauvage, « [...] les aurores sont à la fois merveilleuses et menaçantes. Leur présence peut faire naître en nous un mélange de félicité ou d'effroi, ou quelque inconfortable mélange d'émotions contradictoires » (2).

Il n'est donc pas surprenant qu'au cours des siècles, les observateurs d'aurores aient fourni des interprétations fort surprenantes, et à l'occasion contradictoires, pour expliquer la présence de ces rideaux de lumière multicolores qui flottent et dansent dans le ciel. Ainsi, pendant longtemps, pour les Inuits de l'Alaska, les Finnois, les Écossais et les habitants des Hébrides, les aurores évoquaient les âmes dansantes d'animaux favoris ou des créatures féeriques lumineuses. Pour d'autres cependant, plutôt que de provoquer joie et sourire, les aurores étaient l'esprit des ancêtres disparus et évoquaient des images alarmantes, particulièrement lorsqu'elles se teintaient de rouge. Nulle surprise alors de constater qu'en Europe occidentale, et ce jusqu'au 18^e siècle, aucun présage de malheur n'était plus catastrophique qu'une aurore boréale.

C'est avec les philosophes grecs qu'on voit naître les premières explications « scientifiques » du phénomène. Aristote (384-322 av. J.-C.) classe les aurores parmi les phénomènes météorologiques ou atmosphériques, perpétuant ainsi une tradition bien enracinée dans les cultures des peuples

(2) SAUVAGE, Candace. *Les aurores boréales ou les lumières mystérieuses*, Outremont, Éditions du Trécarré. 2001, p. 24.

anciens. Selon sa théorie, elles sont produites par des vapeurs qui émanent de la terre et qui s'enflamment dans l'atmosphère.

Malheureusement, pendant plus de deux mille ans, depuis le 2^e siècle avant J.-C. jusqu'au 18^e siècle après J.-C., Aristote a joui d'un ascendant sans précédent sur la science et la cosmologie européenne. Les penseurs occidentaux cessent de s'interroger sur les aurores comme sur la plupart des autres phénomènes. L'Univers a été décrit et tous les problèmes ont été résolus.

Heureusement, grâce aux observations et à l'audace de certains chercheurs, des doutes commencent à planer sur l'œuvre d'Aristote. L'un de ces chercheurs, Edmond Halley (1656-1742) observe que peu importe la nature des aurores, celles-ci sont visibles grâce à leur propre lumière, sans l'aide du Soleil. Il ose établir un lien entre le magnétisme terrestre et ces mystérieuses lueurs dansantes. Bientôt, cette théorie est vérifiée par de nombreux observateurs suédois; il existe bel et bien une corrélation entre les aurores boréales et l'aiguille magnétique.

Benjamin Franklin (1706-1790), fervent promoteur de la science de l'électricité, propose sa théorie sur la nature des aurores boréales, en 1779. Selon lui, elles représentent un phénomène de décharge électrique dans l'atmosphère terrestre. L'invention du tube à décharge ou fluorescent semble confirmer cette théorie. Mais encore une fois, le manque de données expérimentales ne permet pas de confirmer cette hypothèse, ni aucune des autres théories proposées jusqu'à ce jour.

C'est alors qu'entre en jeu le savant voyageur prussien, Alexander von Humboldt (1769-1859). Avec des collègues, il met en place, en Europe, un réseau d'observatoires magnétiques qui permet d'étudier avec précision le comportement du champ magnétique terrestre. Les travaux de Karl Gauss (1777-1855), astronome et mathématicien réputé, expliquent les petites variations du champ magnétique terrestre, mais ne peuvent expliquer les fluctuations violentes et occasionnelles que Humboldt a appelées « orages magnétiques ». Cependant, la découverte, vers 1850, de l'augmentation et de la diminution périodiques du nombre de taches solaires, selon un cycle de onze ans (le cycle solaire), permet de mettre au jour une curieuse analogie: la fréquence des orages magnétiques est synchronisée avec le cycle des taches solaires.

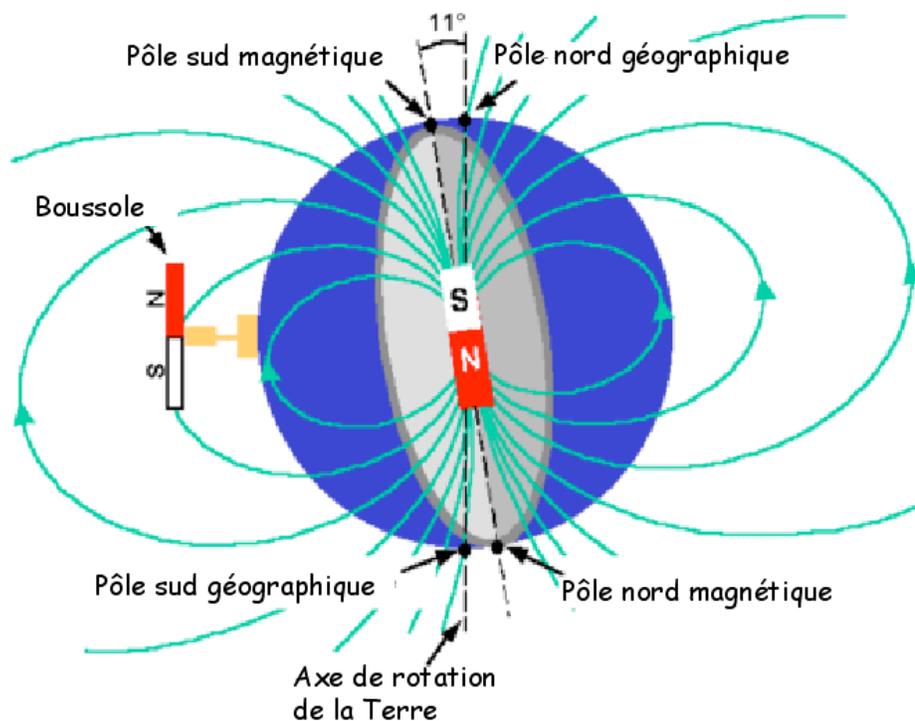
Malgré le scepticisme enregistré alors, le lien avec l'activité solaire devient de plus en plus évident et on peut affirmer, au début du 20^e siècle, que « [...] plus nombreuses sont les taches solaires, plus il y a d'orages magnétiques et plus les aurores sont spectaculaires[...] » (3). Une question demeure : Pourquoi?

(3) SAUVAGE, Candace. *ibid*, p. 82.

Une partie de la réponse viendra d'un nouveau domaine de la physique, l'électromagnétisme, et des travaux du chercheur norvégien Kristian Birkeland (1867-1917), aujourd'hui considéré comme le père de la science moderne des aurores. Birkeland propose une théorie avant-gardiste. Imaginons d'abord que des faisceaux d'électrons soient émis par les taches solaires et qu'ils traversent l'espace jusqu'à la Terre, que ces électrons soient ensuite captés par le champ magnétique de la Terre et déviés vers les pôles et que finalement, les interactions entre ces électrons et les gaz peu denses de la haute atmosphère produisent une décharge lumineuse. Malgré les preuves expérimentales en ce sens, les scientifiques de l'époque rejettent ces idées. D'autant plus que Birkeland ne peut répondre à toutes les objections que soulève sa théorie.

Heureusement, le flambeau est repris par de jeunes chercheurs originaux, S. Chapman (1888-1950) et H. Alfvén (1908-1995), et peu à peu, grâce à l'utilisation toujours croissante des fusées, on étudie *in situ* le phénomène des aurores polaires. Les unes après les autres, les grandes questions sur l'origine et la nature des aurores polaires sont enfin résolues.

Le champ magnétique terrestre



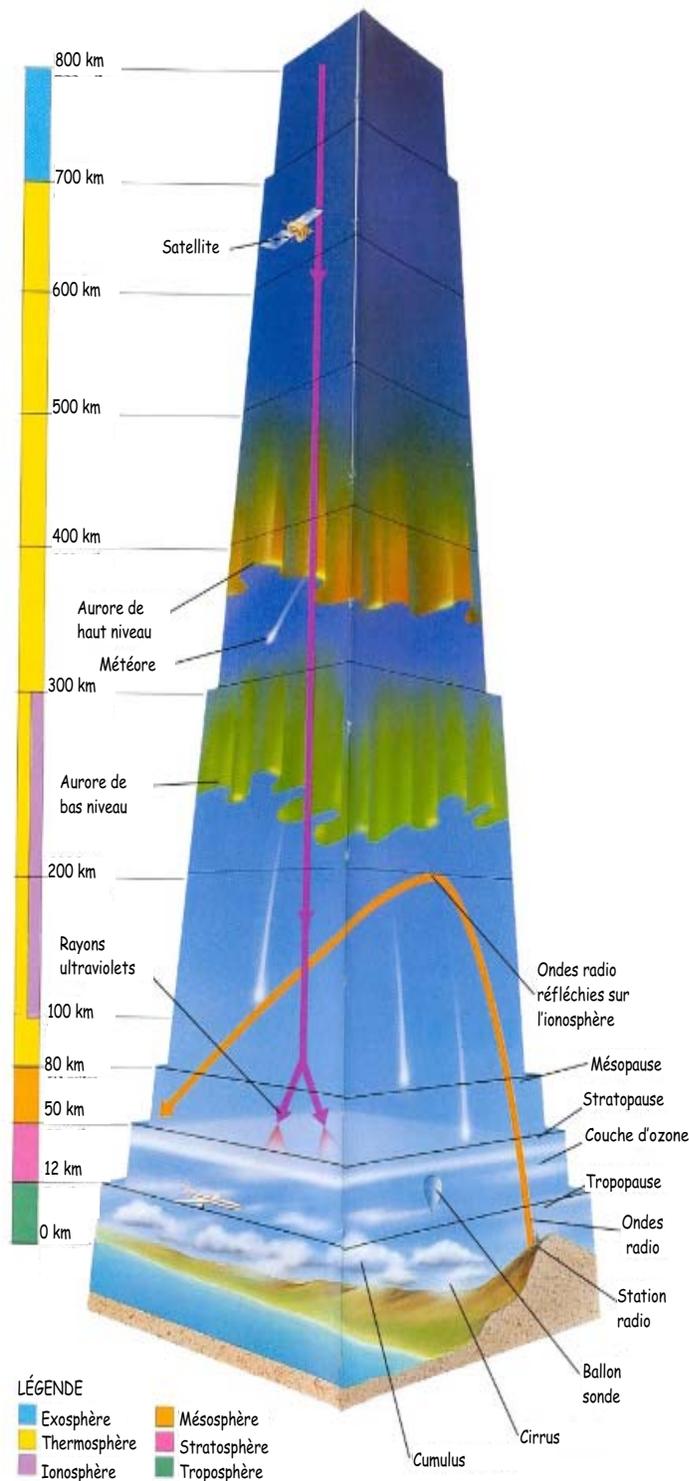
Source : www.nte.ups-tlse.fr/services/ressources/

L'existence du magnétisme terrestre est connue depuis la plus haute Antiquité. La boussole, instrument développé par les Chinois vers l'an 200 après J.-C., permet de mesurer l'effet du champ magnétique terrestre sur une aiguille aimantée. On a donc dressé, au fil des ans, la carte magnétique de la surface de la Terre et montré que notre planète se comporte comme un aimant géant, dont l'axe ne coïncide cependant pas tout à fait avec l'axe de rotation. Le pôle Sud magnétique se trouve actuellement dans l'archipel arctique canadien, à 1 900 km environ du pôle Nord géographique, tandis que le pôle Nord magnétique se situe dans l'océan Antarctique, au large de la terre Adélie, à 2 600 km environ du pôle Sud géographique. La prudence est cependant de mise, car les pôles magnétiques se déplacent lentement d'année en année. Sans compter que le champ magnétique terrestre s'est inversé plusieurs fois au cours de l'histoire de la Terre!

Le champ magnétique terrestre est sans aucun doute produit par le noyau de fer de la Terre, mais son origine demeure incertaine. L'hypothèse de l'effet dynamo, qui explique la production d'un champ magnétique par un courant électrique constamment maintenu et circulant dans la coquille externe fluide du noyau, est certes acceptée par la plupart des scientifiques, mais demeure à l'étude.

Mentionnons en terminant le rôle important que joue le champ magnétique terrestre pour la survie des espèces vivantes. Il agit en effet comme un bouclier et protège la surface de la Terre des particules chargées du vent solaire qui seraient mortelles pour la plupart des espèces terrestres.

La structure de l'atmosphère terrestre



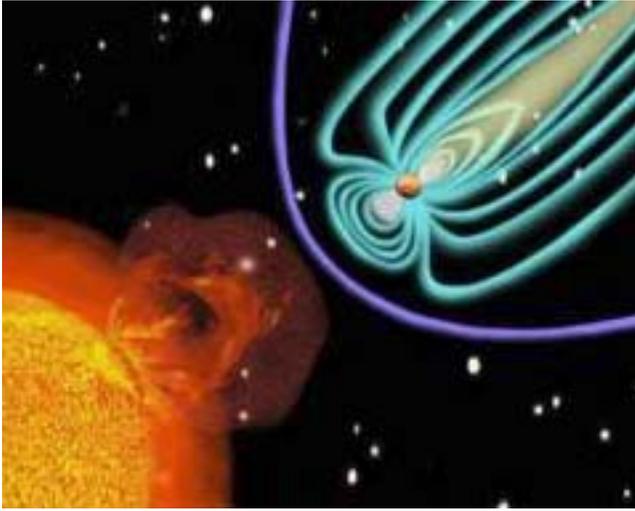
Source : mediatheek.thinkquest.nl/~11125/en/leftatmos.htm

L'atmosphère de la Terre forme une mince pellicule protectrice autour du globe. Au niveau de la mer, elle est composée essentiellement d'azote et d'oxygène, avec des traces d'argon, de gaz carbonique et de néon. Les trois quarts de la masse totale de l'atmosphère se trouvent entre le sol et une altitude de 12 km. Cette région se nomme troposphère. Presque tous les phénomènes atmosphériques que l'on observe se situent à l'intérieur de la troposphère. Depuis la surface terrestre jusqu'à la frontière de cette zone, la température et la pression ne cessent de diminuer.

La couche située tout juste au-dessus de la troposphère, la stratosphère, se situe entre 10 et 70 km d'altitude. La température y remonte à cause de l'absorption des photons ultraviolets du Soleil par la couche d'ozone et l'air y circule principalement par strates horizontales.

Au-delà de 70 km d'altitude se trouve l'ionosphère, une zone extrêmement ténue. C'est à cet endroit que les molécules d'oxygène et d'azote absorbent les rayons très énergétiques du Soleil. Cette énergie sert à dissocier les molécules et les atomes et à les ioniser. La vitesse de recombinaison y est lente (à cause de la faible densité et des collisions plus rares) et les électrons peuvent rester libres pendant très longtemps.

Perturbations en vue...



Source : perso.wanadoo.fr/tpe.mars/
images/champmagnetique.jpg

Une aurore active produit toujours des fluctuations du champ magnétique terrestre que seuls des instruments sensibles peuvent détecter. On s'en doute, de telles perturbations ne durent que quelques heures et se limitent la plupart du temps aux zones déterminées par les ovales auroraux, soit au-dessus de l'Arctique et de l'Antarctique.

Au contraire, les orages magnétiques qui résultent d'une activité solaire exceptionnelle durent plusieurs jours et peuvent causer des dommages importants aux infrastructures

humaines. La grande éruption solaire à l'origine de l'effondrement du réseau électrique de la société Hydro-Québec en 1989 est survenue le 10 mars, vers 14 h. La rafale de vent solaire est arrivée sur Terre vers minuit, le 12 mars, provoquant de superbes aurores boréales rougeoyantes et la panne du réseau électrique québécois deux heures et demie plus tard.

Lorsqu'une bouffée de protons et d'électrons pénètre dans le champ magnétique terrestre, les particules suivent des directions opposées en raison de leur charge électrique. Ces mouvements opposés génèrent des courants électriques intenses qui font varier rapidement l'intensité du champ magnétique terrestre. Il n'en faut pas plus pour induire des courants électriques dans le sol ou dans tous les objets qui sont de bons conducteurs d'électricité comme les rails des voies ferrées, les lignes électriques, les pipelines et les câbles transocéaniques. En 1989, l'équipement d'Hydro-Québec n'a pas tenu le coup, mais des correctifs ont été apportés et aucune autre panne associée à des orages magnétiques ne s'est produite depuis.

Les réseaux de transport d'électricité ne sont pas les seuls touchés par l'activité solaire intense : les communications radio sont elles aussi très perturbées. Ordinairement, l'ionosphère agit comme un miroir sur lequel se réfléchissent les ondes radio, permettant de communiquer sur de grandes distances, même au-delà de l'horizon. Mais lorsque l'ionosphère est perturbée par de forts courants auroraux, elle ne se comporte plus comme un miroir parfait. Les communications sont donc entrecoupées, embrouillées et même inaudibles.

Activité solaire

Effets secondaires

Plusieurs manifestations se déroulant à la surface du Soleil ou dans son environnement proche laissent des indices très nets sur le niveau d'activité de notre astre du jour. Les taches solaires, observées et dénombrées avec assiduité depuis près de 400 ans, représentent une excellente indication du niveau d'intensité du champ magnétique solaire. Plus les taches sont nombreuses, plus la surface du Soleil est active « magnétiquement ».

Des champs magnétiques puissants se concentrent dans les taches; lorsque plusieurs d'entre elles se rapprochent, il peut se produire une brusque libération d'énergie, phénomène appelé éruption solaire. Si l'intensité de l'éruption est très grande, les gaz de la couronne solaire peuvent se réchauffer suffisamment pour provoquer une éjection violente de matière. On parle alors d'éjections de matière coronale. Naturellement, au maximum du cycle solaire, ces phénomènes sont plus fréquents et ce sont eux qui sont les plus à craindre pour ce qui est de la perturbation des infrastructures humaines, aussi bien dans l'espace que sur la terre.

L'orage magnétique créé par ces phénomènes peut affecter les satellites en orbite autour de la Terre. L'énergie en jeu est si élevée que la haute atmosphère terrestre se réchauffe et devient plus dense. Mauvaise nouvelle pour les satellites dont le freinage accru peut avoir des conséquences catastrophiques. Lors du maximum solaire de 1989, un satellite américain s'est complètement désintégré en plongeant dans l'atmosphère terrestre. De même, certaines composantes électriques des satellites peuvent être endommagées ou détruites par ces brusques bouffées d'énergie. En 1994, deux satellites canadiens de type Anik ont été temporairement mis hors d'usage de cette façon.

Les scientifiques et les dirigeants d'entreprises sont donc conscients du milieu hostile dans lequel évoluent les satellites. Afin de protéger leurs engins, ils ont inventé une « météo spatiale ». Bien qu'encore empirique à maints égards, cette surveillance en continu du vent solaire permet quand même, lors d'une alerte, de prendre un minimum de précautions pour protéger les satellites.

Pour les astronomes amateurs, par contre, une alerte est une source de joie, car une aurore boréale se pointera peut-être à l'horizon.

Bibliographie

Générale

CORNEILLE, Pierre. *Les classiques pour tous*, Paris, Librairie Hatier.

LYNCH, David K. et William LIVINGSTON. *Color and Light in Nature*, Cambridge, Cambridge University Press, 1995, 254 p.

SAUVAGE, Candace, *Les aurores boréales ou les lumières mystérieuses*, Outremont, Éditions du Trécarré, 2001, 144 pages.

SAUVAGE, Candace. *Aurora, the Myterious Northern Lights*, Buffalo, Firefly Books Inc. (U.S.), 2001, 144 pages.

SÉGUIN, Marc et Benoît VILLENEUVE. *Astronomie et astrophysique*, Saint-Laurent, Éditions du Renouveau pédagogique inc., 1995, 550 p.

SUAGHER, Françoise et Jean-Paul PARISOT. *Jeux de lumière, les phénomènes du ciel*, Besançon, Éditions Cêtre, 1995, 176 p.

Spécialisée

ADZEL, Amir D. *The Riddle of the Compass : The Invention That Changed the World*, San Diego, Harvest Book/Harcourt Inc. 2001, 178 p.

BOISCHOT, André. *Le soleil et la Terre*, Paris, Presses universitaires de France, 1966, 128 p. (Que sais-je? N° 1233)

DAVID, Ian et John et Margaret MILLAR. *The Cambridge Dictionary of Scientists*, [2^e édition], Cambridge University Press, 2002, 428 p.

ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS ET ALBIN MICHEL. *Dictionnaire de l'astronomie*, collectif, Paris, 1966, 1005 p.

HAUBERT, André. *L'ionosphère*, Paris, Presses universitaires de France, 1972, 128 p. (Que sais-je? N° 1477)

JAGO, Lucy. *The Northern Lights : The True Story of The Man Who Unlocked the Secret of the Aurora Borealis*, New York, Alfred A. Knopf Publisher, 2001, 297 p.

LA COTARDIÈRE, Philippe de. *Histoire des sciences, de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Tallandier éditions, 2004, 659 p.

THOUIN, Marcel. *Explorer l'histoire des sciences et des techniques; activités, exercices et problèmes*, Sainte-Foy, Éditions MultiMondes, 2004, 693 p.