

L'aéronomie, ou de l'origine des aurores polaires

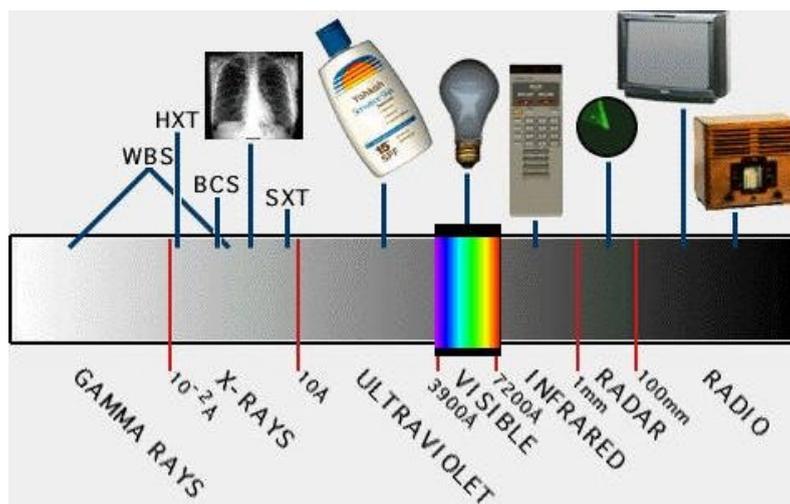
Résumé

L'aéronomie est l'étude de la haute atmosphère, c'est à dire au-dessus des couches météo. Dans ce texte, nous nous intéresserons à des altitudes plus élevées encore, au-dessus de 80 kilomètres. C'est à dire là où une partie minoritaire du gaz absorbe les photons solaires les plus énergétiques en s'excitant ou en libérant un électron. Là encore où s'absorbent les particules (électrons et protons) issues du vent solaire. En effet, outre la lumière, le Soleil émet en permanence un flux d'électrons et de protons voyageant à environ 400 km par seconde. D'autres phénomènes liés à l'activité solaire engendrent un vent solaire dit «rapide», à environ 750 kilomètres par seconde. Lorsque ces vents rencontrent une planète sur leur parcours, ils ricochent dessus, comme l'air sur une voiture. Mais si la planète possède un champ magnétique, il en va tout autrement. En effet, les électrons et protons dont ils sont constitués y sont sensibles. Ils commencent par rebondir non sur l'atmosphère ou sur la planète elle-même, mais sur ce champ magnétique. Pour une bonne part, ils se retrouvent côté nuit de la planète. Là, ils sont happés par ce champ, et attirés vers les pôles magnétiques nord et sud. En arrivant dans l'atmosphère, typiquement entre 65° et 75° de latitude, ces particules se cognent sur le gaz ambiant. Celui-ci s'échauffe, s'agite, et en revenant à un état plus calme, émet de la lumière. Lorsque cette lumière est assez intense pour être vue à l'oeil nu, on a une aurore polaire, boréale au nord, australe au sud. C'est le cas sur la Terre, mais aussi sur Jupiter et Saturne. Examinons à présent le détail de ces phénomènes.

L'ionosphère diurne

Spectre solaire

Le spectre solaire s'étend sur une large gamme de longueurs d'ondes, depuis le dixième de nanomètre (nm) 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. Ne nous méprenons pas ! Le Soleil n'est pas bleu pour autant ! Le mélange de toutes les couleurs, l'absorption de la lumière par l'atmosphère terrestre, aussi bien que la sensibilité de nos yeux nous le montrent jaune (et rouge au coucher). Cette partie du spectre a été étudiée depuis le 19^{ème} siècle.



Cette image a été composée par les chercheurs du team du satellite japonais d'observation du soleil YOKHOH. Elle montre les diverses longueurs d'ondes avec leur nom en dessous de l'image. Au dessus, on voit les produits du commerce qui y sont associés. A gauche, les sigles WBS, HXT, BCS et SXT correspondent aux instruments à bord du satellite.

Néanmoins, la lumière visible a peu d'importance pour la haute aéronomie en comparaison de l'ultraviolet (100 à 390 nm) ou de l'extrême ultraviolet (20 à 100 nm). Les premiers sont en effet assez énergétiques pour exciter l'atmosphère, tandis que les seconds peuvent de surcroît l'ioniser, c'est à dire arracher un ou même plusieurs électrons d'un atome ou d'une molécule. Ces longueurs d'ondes sont arrêtées au-dessus de typiquement 80 km d'altitude. Il n'est donc pas étonnant qu'il ait fallu attendre une période récente pour en mesurer le spectre : lorsque Planck, en 1901, présenta sa théorie du corps noir, il était loin de suspecter la présence, dans la queue de distribution, d'un rayonnement aussi intense. Le premier spectre dans ces gammes de longueurs d'onde a été obtenu en 1946, au cours des premières expériences à bord de fusées. En 1977, une compilation donnait lieu à un premier spectre de référence théorique. Cependant, les mesures avaient montré la grande variabilité du rayonnement U.V. en fonction de l'activité solaire. Dans la même période, trois satellites américains de la série Dynamics Explorer emportaient des spectrographes d'observation dans l'ultraviolet. Malheureusement, seul Dynamics Explorer E fut en état de fonctionner. Même si les progrès accomplis grâce à cet instrument furent considérables, un problème majeur résida dans le fait que ces flux étaient relatifs : il n'y avait pas d'étalonnage à bord. Les valeurs absolues furent obtenues en comparant avec des mesures simultanées à bord de fusées, puis, sur le long terme en corrigeant la dérive instrumentale estimée du spectrographe embarqué.

De 1980 à 1988, il n'y eut aucun instrument embarqué mesurant ce flux. On pu parler, pour décrire cette période, de "trou d'U.V." ! Le satellite San Marco renoua avec cette mesure en 1988. A bord du satellite SOHO, pas moins de quatre instruments observent des parties du spectre solaire dans l'extrême ultraviolet. Malheureusement, plusieurs d'entre eux ne sont pas étalonnés, si bien qu'en ce début de siècle, nous sommes toujours incapables de dire, à un instant donné, combien de ces photons très énergétiques bombardent notre planète. En Mars 2001, peut-être un morceau du voile se déchirera-t-il avec le lancement du satellite américain TIMED.



Deux aéronomes espèrent bientôt connaître le flux solaire euv (source : E. Sartre)

Création de l'ionosphère

La Terre a une première caractéristique importante : elle possède une atmosphère, dont les principaux composants sont l'oxygène et l'azote moléculaires (c'est à dire deux atomes d'oxygènes ou d'azotes liée entre eux chimiquement) 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 un million de milliards de particules par mètre cube à 400 km et cent milliards de milliards de particules par mètre cube à 80 km. Est-ce beaucoup ? Non, c'est l'espace ! Par comparaison, l'air que nous respirons contient quelques milliards

de fois plus de particules dans le même volume. 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.

Les photons dans l'E.U.V. décrits ci-dessus possèdent des énergies supérieures aux seuils d'ionisation des différents constituants atmosphériques (ces seuils sont tous de l'ordre de 10 eV). C'est à dire qu'ils sont susceptibles de casser atomes et molécules, et arracher un (parfois deux) électron périphérique : c'est une ionisation. Les excitations sont également un processus d'absorption des ultraviolets, si bien que notre atmosphère constitue un véritable filtre pour ces rayons, mortels pour les hommes.

La partie ionisée de l'atmosphère est appelée ionosphère. On y distingue entre autre deux régions, appelées E et F. Dans la première, entre 80 et 140 km approximativement, les ions sont principalement moléculaires et les températures des électrons et des ions sont proches l'une de l'autre. La concentration des électrons atteint quelques cent milliards par mètre cube à 110 km environ (cent millions de fois plus petite que celle du gaz neutre).

La région F quant à elle est divisée en 3 parties : entre 140 et 200 km (région F₁), il y a transition entre les ions moléculaires et les ions atomiques. La région F₂, au-dessus de 250 km, est celle du second maximum de concentration d'électrons. Il n'y a qu'un ion abondant, l'oxygène atomique ionisé une fois (c'est à dire ayant perdu un électron). Au-dessus de la région F₂ se trouve la région F supérieure, avec une transition entre l'oxygène ionisé et les ions plus légers d'hydrogène ou d'hélium. Au-dessus de 300 km, la concentration devient si faible que les collisions entre particules sont en nombre négligeable pour décrire la dynamique de cette partie de l'atmosphère. La température des électrons est à peu près 1400 K à 400 km alors que la température des ions atteint "seulement" 1100 K à la même altitude.

L'ionosphère aurorale

Vent solaire et éruptions

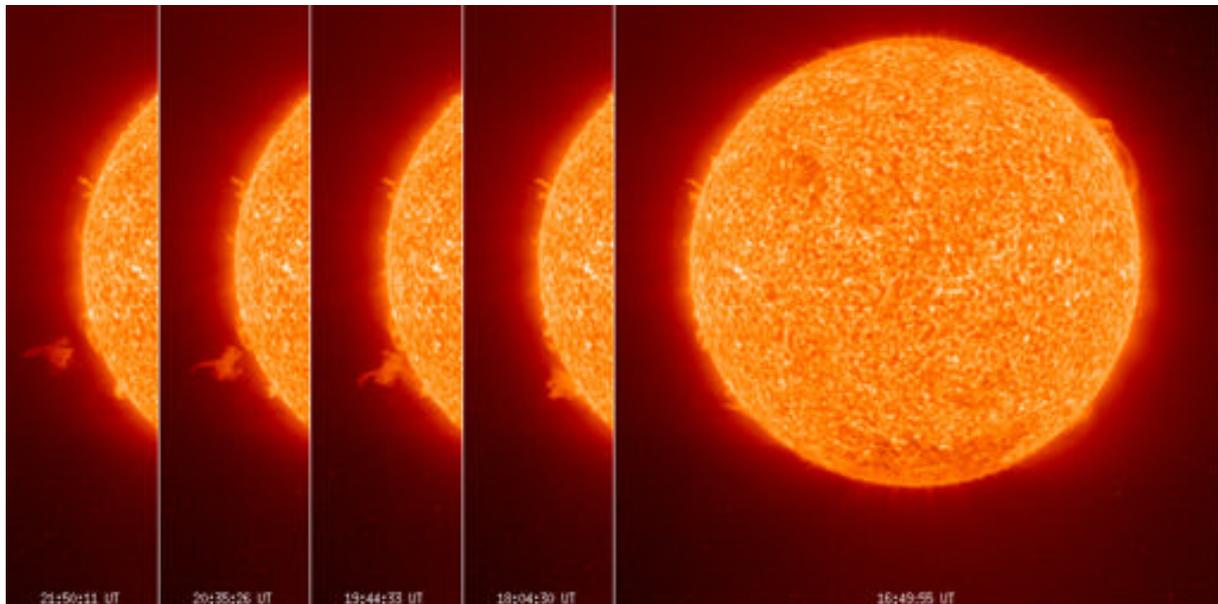
Regarder le Soleil à différentes longueurs d'ondes permet de voir sa surface à différentes altitudes sous la chromosphère. A 575 nm par exemple, on peut voir ses granulations, c'est à dire la surface de la couche convective.



Photographie des granulations de la photosphère du Soleil calme (source : base de donnée solaire BASS2000, Observatoire Midi Pyrénées)

Pour imaginer ce qui se passe, on peut procéder par analogie, en regardant bouillir une soupe épaisse dans une casserole. Les bulles de soupe les plus chaudes montent depuis le fond jusqu'à la surface et explosent. La flamme de la cuisinière représente le noyau nucléaire du Soleil. Bien que l'échelle ne soit pas respectée, le fond de la casserole représente la région radiative solaire, dans laquelle de l'énergie est transportée sans transfert de matière. Enfin, la soupe solaire est composée d'électrons et de protons au lieu des légumes du jardin. Vues de loin, les bulles de soupe qui montent et qui descendent ressemblent à des grains de riz. Les gouttes qui s'échappent de la casserole (et qui retombent sous l'effet de la gravité terrestre...aucune simulation n'est parfaite!) représentent le vent solaire. Enfin, l'évaporation au-dessus de la casserole correspond à la couronne 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.

La partie ionique du vent solaire est composé de 95% d'ions d'hydrogène et 5% d'ions d'hélium. Dans le plan de l'écliptique¹, au niveau de l'orbite de la Terre, il souffle à une moyenne de 400 km.s^{-1} . Cependant de récentes observations du satellite ULYSSE ont montré que cette vitesse augmentait jusqu'à 750 km.s^{-1} environ pour des latitudes solaires supérieures à 20° . A une unité astronomique², sa concentration 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 concentration était divisée de moitié pour des latitudes solaires supérieures à 20° .



Eruption solaire prise par le satellite SOHO. L'image se lit de droite à gauche

Avec une périodicité d'environ 11 ans, le Soleil connaît aussi des périodes de forte activité pendant lesquelles des taches sombres apparaissent à sa surface. Dans ces taches, le champ magnétique est

¹ Plan de rotation de la Terre autour du Soleil

² Distance moyenne Soleil-Terre, soit 1 495 978 710 mètres

plus élevé (jusqu'à un millier de fois) que n'importe où ailleurs à la surface du Soleil. Par conséquent, 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. Lorsque les taches ont différentes polarités, un tube de force magnétique peut être créé. Les électrons et les ions sont conduits le long de cette ligne neutre par les forces de Lorentz.

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 de masse coronale dont la physique n'est pas encore bien expliquée.

Sur la Terre, il s'en suit un à trois jours plus tard des perturbations magnétiques, dues à l'interaction du champ géomagnétique³ et du champ magnétique porté par le vent solaire. Si leur effet se cantonne aux hautes latitudes, on parle de sous-orage magnétique. Dans les cas, beaucoup plus rares où les perturbations touchent l'ensemble du globe, on parle d'orage magnétique. Les effets peuvent s'avérer spectaculaires. Ainsi, le 13 mars 1989, un orage magnétique a causé la panne de générateurs au Québec, coupant l'électricité à 6 millions de Canadiens et d'Américains pendant 9 heures. Le même orage fit gonfler l'atmosphère terrestre, augmentant la friction sur des satellites, et ainsi fit monter leur orbite ! La prévision des perturbations solaires – et partant des perturbations de notre monde technologique – est le domaine d'une branche récente de l'astronomie : la météorologie de l'espace.



Fonte d'un transformateur causée par l'orage magnétique du 13 mars 1989 sur les installations hydroélectriques québécoises (source : The International Auroral Study, C. Cattel, U. du Minnesota)

Entrée dans la magnétosphère

En ce qui concerne les aurores, la Terre a une seconde caractéristique importante : c'est une planète magnétisée. En l'absence de vent solaire, la forme du bouclier magnétique de la Terre serait à peu près celle d'un dipôle, s'étendant dans n'importe quelle direction vers l'infini. L'interaction du bouclier 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. Pratiquement aucune particule ne peut

³ géo désigne ce qui est terrestre

traverser la frontière sur laquelle la pression du champ magnétique compense celle du vent solaire. Cette frontière s'appelle la magnétopause et se situe typiquement à 10 rayons terrestres côté jour, valeur qui peut descendre jusqu'à 7 après de fortes éruptions solaires. L'intérieur de cette cavité, relativement protégée du vent solaire, s'appelle la magnétosphère. Elle est comprimée vers la Terre côté jour, et s'étend en une longue queue étirée par le vent solaire côté nuit, ce qui lui donne un peu la forme d'un suppositoire.

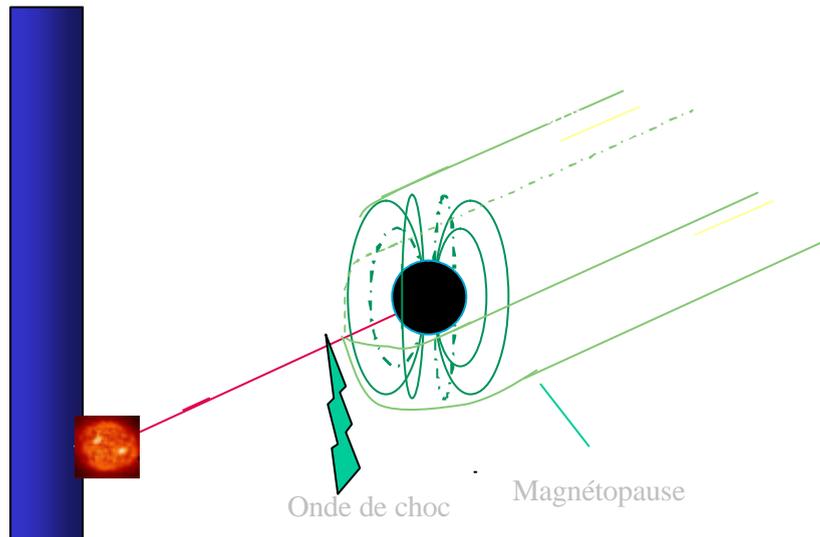


Illustration montrant la forme de la magnétosphère. En amont, le vent solaire heurte le champ magnétique terrestre ce qui crée une onde de choc. Les électrons et les protons du vent solaire, sous l'effet du champ géomagnétique, subissent une séparation, les uns s'écoulant côté matin, les autres côté soir.

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. D'autres se rejoignent côté nuit à une distance d'environ 30 rayons terrestres, dans la zone dite de reconnexion. Sous l'effet des collisions, une partie de ces particules s'en va dans l'espace, alors que l'autre partie est ramenée vers la Terre. Le champ géomagnétique a claqué la porte au nez du vent solaire, mais ce dernier est tout de même revenu en passant par la fenêtre!

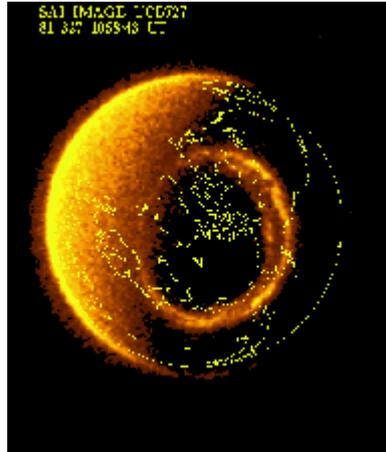
De façon extrêmement simplifiée, côté jour, le vent solaire, en approchant de la Terre, «voit» le champ géomagnétique qui, selon les lois d'Ampère, crée une séparation de charges. Davantage d'ions dérivent le long de la magnétopause côté ouest, et davantage d'électrons côté est, générant un champ électrique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

Sous l'effet conjugué de ce champ électrique et du champ géomagnétique, 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 elles 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 tourner autour d'une ligne du champ magnétique local 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 du champ magnétique. Les pieds de ce volume tracent sur la Terre deux ovales appelés ovale auroraux, typiquement situé entre 65° et 75° latitudes nord et sud. Ces deux ovales existent en permanence, car le vent solaire souffle de façon continue.

Entrée dans l'atmosphère et production d'une aurore

Entre 500 et 100 kilomètres d'altitude, c'est à dire aux altitudes de vol de la navette spatiale ou des satellites en orbite basse, les particules précipitées vont heurter le mélange de gaz. Certaines collisions sont simplement élastiques, qui renvoient une partie du flux entrant vers l'autre hémisphère le long de la ligne locale du champ magnétique. 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 !



Photographie de l'ovale auroral le 23 novembre 1981, à 10.48 TU, par Dynamics Explorer. A gauche de l'image, il s'agit de l'atmosphère excitée et ionisée par le flux solaire ultraviolet

De plus, 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.



Cette gravure du 19^{ème} siècle portait comme légende : « la glace se soulevant sous une aurore boréale »

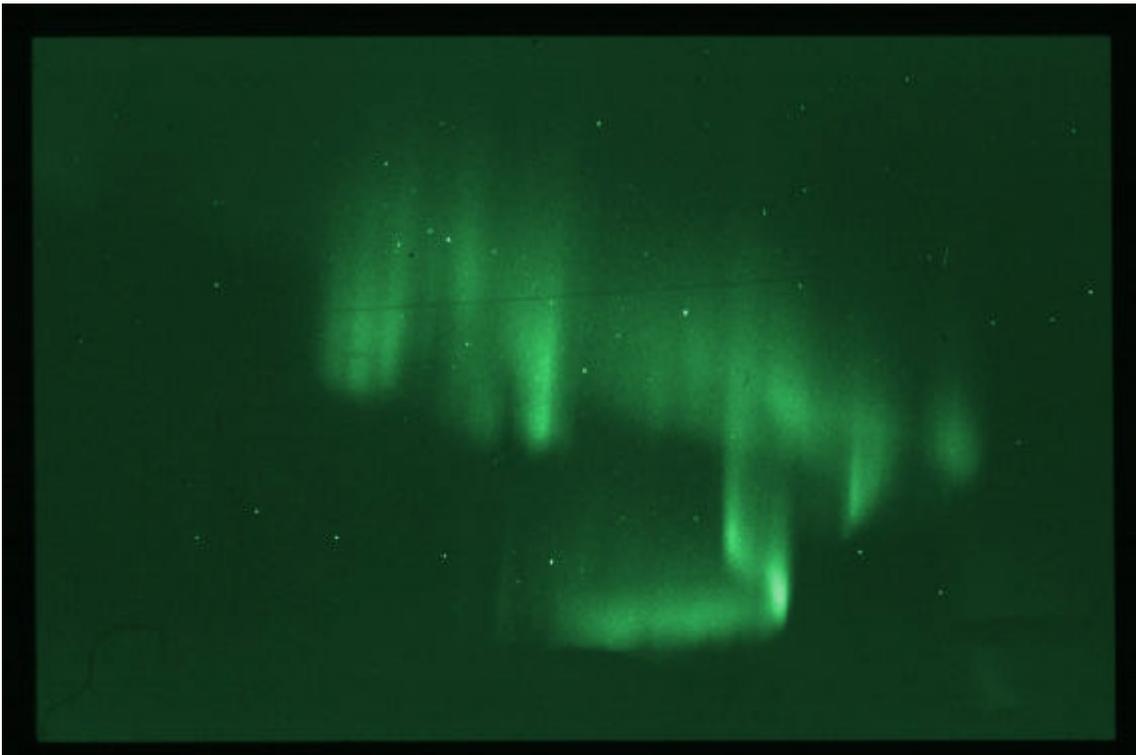
On ne peut les voir que pendant la nuit, car si l'ovale auroral existe en permanence, sa lumière est si ténue qu'elle est écrasée par celle du jour, et même par celle de la pleine lune. Comme elles se produisent au dessus de 80 km, il faut également un ciel clair pour les voir. Ces conditions sont réunies en particulier en hiver, par les grands froids secs, ce qui a fait associer à tort les aurores avec l'arrivée du froid. Ces froids font craquer les glaces polaires, ce qui est la source de nombreuses et terrifiantes légendes.

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. Chaque couleur identifie parfaitement son émetteur (oxygène atomique ou moléculaire, azote etc. ...). A chaque instant se crée une nouvelle composition dans un silencieux ballet. En période de forte activité solaire, les aurores peuvent succéder aux aurores, alternant les tableaux : 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.

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.

Les photos suivantes sont de l'auteur. Elles peuvent être librement utilisées avec la mention du Laboratoire de Planétologie de Grenoble.







Ici, Jupiter, Saturne et Mars se dévoilent derrière l'aurore

D'autres images sont disponibles sur le site du Laboratoire de Planétologie de Grenoble :

<http://www-lpg.obs.ujf-grenoble.fr/>

Voici également quelques url à consulter :

<http://bass2000.bagn.obs-mip.fr/>

<http://www.obspm.fr/departement/dasop/previ/w3/previ.html>

<http://gedds.pfrr.alaska.edu/aurora/>

<http://seldon.eiscat.no/index.html>

<http://www.hao.ucar.edu/>

<http://www.ias.fr/>

<http://bolero.gsfc.nasa.gov/ias/ias.html>

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html>

<http://www.windows.umich.edu/spaceweather/>

<http://www.space.lockheed.com/SXT/homepage.html>