

# Une aurore dans notre ciel le 13 mars 1989

par M. Roth

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

**Abstract.** During the night of 13-14 March 1989 an aurora borealis was observed in France, Belgium and the Netherlands. In Uccle, this aurora was first observed around 21h25 UT and was still visible after local midnight. In order to explain the unusual occurrence of an aurora at low latitudes, the usual location of auroras at high latitudes is first described. From the structure of the magnetosphere, we show that the glow always appears as an oval band surrounding the dipole pole. The auroral oval should not be confused with the auroral zone. We recall that the latter is simply the midnight part of the oval where intense auroral displays are most frequently seen. In the second part of the paper, we explain why the auroral oval moves towards the equator when the magnetic activity increases. Finally, a review of the numerous solar and geophysical events which occurred during the period March 6-19 is presented. An attempt is made to relate these events to the appearance of the 13 March aurora.

Le soir du lundi 13 mars 1989, on a pu contempler dans notre ciel une splendide aurore boréale. Cette aurore fut également observée en France et aux Pays-Bas. A Uccle, celle-ci fut aperçue à partir de 22 h 30 et était encore visible après minuit.

Une aurore boréale illuminant notre ciel est un phénomène rare sous nos latitudes. De plus, l'observation d'un tel phénomène est souvent gênée par les mauvaises conditions météorologiques propres à notre climat.

Pourquoi une aurore peut-elle être observée aux latitudes moyennes? Pour répondre à cette question, il est d'abord nécessaire de préciser la localisation habituelle des aurores et leur déplacement à grande échelle lorsque l'activité magnétique s'intensifie. Ces aspects seront décrits dans les deux premières parties de cet article. Il ne fait cependant pas de doute que cette aurore dans notre ciel, le 13 mars, est liée à la cascade d'éruptions solaires qui s'est produite au cours de la semaine précédente. A la lumière des informations connues à ce jour (31 mars), le point sera fait, dans la troisième partie de cet article, sur les événements solaires et géophysiques qui se sont déroulés du 6 au 19 mars. Dans cette troisième partie, un scénario sera également proposé, qui tentera d'établir les relations entre ces événements et la présence d'une aurore dans notre ciel, le 13 mars.

## Observations en Belgique d'aurores boréales

En consultant les anciens numéros de *Ciel et Terre*, on trouve trace de quelques aurores ayant été observées en Belgique, spécialement au voisinage des maxima d'activité solaire. Parmi les aurores observées lors des derniers cycles, et recensées dans notre revue, citons celles du:

- 15 août 1947: rayons, jets, faisceaux de lumière; couleurs: blanc-bleu, rouge;
- 8 août 1948: bandes lumineuses, tache triangulaire; couleurs: sans couleur spéciale;
- 20 novembre 1948: arc, bande; couleurs: rouge, «tube néon foncé»;
- 14 octobre 1949;
- 21 janvier 1957: traînée, draperies, raies, zones; couleurs: rouge-sang, blanc, verdâtre, rose;
- 30 juin 1957: raies parallèles, rayons intenses; couleurs: blanc verdâtre;
- 29 septembre 1957: traînées brillantes, arc de cercle, rayons, zones; couleurs: rougeâtre, rose, blanchâtre, bleu;
- 13 mars 1989: bande, tache; couleurs: rouge-sang, blanchâtre, ... (voir le prochain numéro pour plus de détails).



▲ Photo: Aurore du 13 mars 1989.

Reproduction en noir et blanc d'une diapositive en couleurs de l'aurore du 13 mars 1989, avec notamment des rayons verticaux s'élevant au-dessus de l'horizon. Les étoiles les plus brillantes sont bien visibles, comme celles du W de Cassiopee. Pose de 2 minutes avec appareil de focale 24 mm F/D = 2,8, sur film Fujichrome 100.

[Cliché obtenu par Marc Tannier (Hernée), aimablement transmis par la SAL]

Cette liste n'est évidemment pas complète et ne comprend pas nécessairement toutes les aurores vues en Belgique depuis cinquante ans. Nous ne la donnons qu'à titre indicatif pour préciser la rareté de ce phénomène.

Références: *Ciel et Terre*, 1948, pp. 268-269; 1949, pp. 39-40, p. 282; 1957, pp. 78, 220, 400, 475-479, 580.

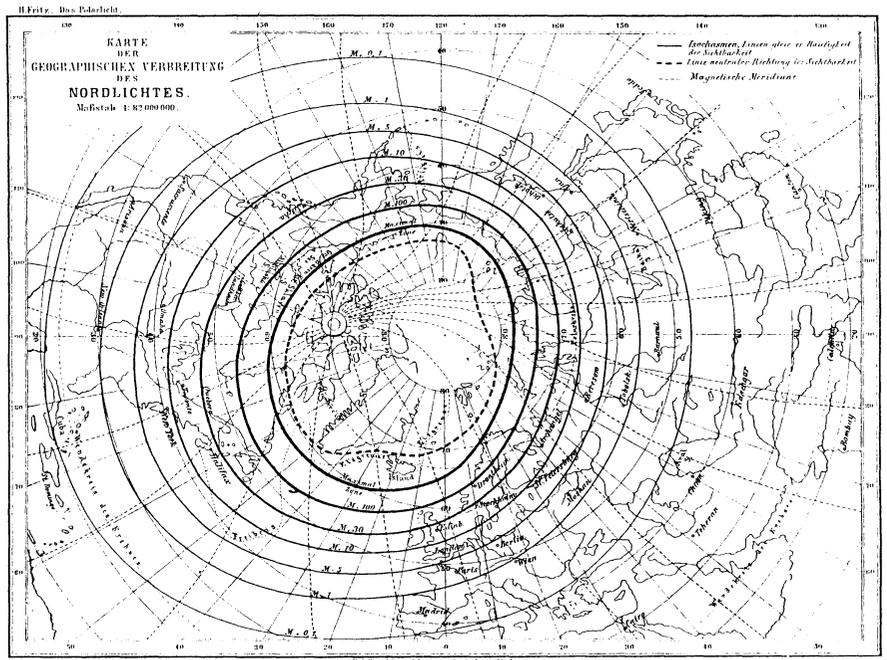
## I. La localisation des aurores

### La zone aurorale

La fréquence d'occurrence aurorale ( $M$ ), c'est-à-dire le nombre annuel moyen de nuits pendant lesquelles un phénomène auroral peut être observé, est une fonction de la latitude. Dans l'hémisphère nord, cette fréquence est maximale ( $M \sim 250$ ) à une latitude dipolaire<sup>(1)</sup> d'environ  $67^\circ$ , dans une bande étroite, quasi-circulaire, entourant le point de percée du dipôle magnétique de la Terre. Par contre, elle décroît rapidement dès que l'on s'écarte de cette région d'occurrence maximale, qui est appelée « zone aurorale ».

C'est au 19<sup>e</sup> siècle que se concrétisa l'existence de cette zone. On n'ignorait pas, bien sûr, que les aurores devenaient de plus en plus fréquentes au fur et à mesure que l'on voyageait vers le Grand Nord, au départ des latitudes tempérées. John Franklin, un explorateur anglais, semble bien être le premier à avoir remarqué, au cours de l'un de ses voyages vers le pôle entre 1819 et 1822, que l'augmentation de la fréquence d'apparition des aurores n'était pas permanente au cours d'un périple vers le pôle, car, au-delà d'une certaine latitude, la fréquence d'apparition des aurores diminuait.

Les récits de nombreux explorateurs arctiques aidèrent ainsi les scientifiques du 19<sup>e</sup> siècle à dresser les premières cartes de la répartition géographique des aurores. Ainsi, Elias Loomis, un professeur britannique de Philosophie Naturelle et d'Astronomie au *Yale College*, établit la première carte de la zone aurorale, publiée en 1860. Le physicien allemand Herman Fritz, professeur à l'Institut polytechnique de Zurich, développa par la suite le travail de Loomis. La figure 1 reproduit une carte de Fritz publiée en 1881. Sur cette carte, la latitude géographique est représentée par les cercles concentriques en traits fins. Par contre, les courbes en traits forts sont les lieux d'égale fréquence aurorale (cette fréquence est donnée par le nombre  $M$  repris sur chaque courbe). On voit ainsi qu'au sud de l'Italie, à  $40^\circ$  de latitude géographique, la fréquence d'occurrence



▲ Figure 1. Distribution géographique de la fréquence d'occurrence aurorale dans l'hémisphère Nord. Les courbes en traits pleins relient les endroits ayant la même fréquence d'occurrence  $M$  (en nuits par année).

[D'après H. Fritz, *Das Polarlicht*, Leipzig: Brockhaus, 1881].

### La magnétosphère terrestre

Aux très hautes altitudes, l'atmosphère terrestre devient de plus en plus ionisée et forme autour de la Terre une couche concentrique, conductrice de l'électricité : l'ionosphère. Cette ionisation de la haute atmosphère devient significative à partir d'une altitude d'environ 60 km. En effet, à partir de cette altitude, la raréfaction de l'air réduit de plus en plus le nombre de chocs entre les particules de l'atmosphère résiduelle, empêchant ainsi la recombinaison des espèces ionisées, formées sous l'influence croissante du rayonnement solaire de courte longueur d'onde.

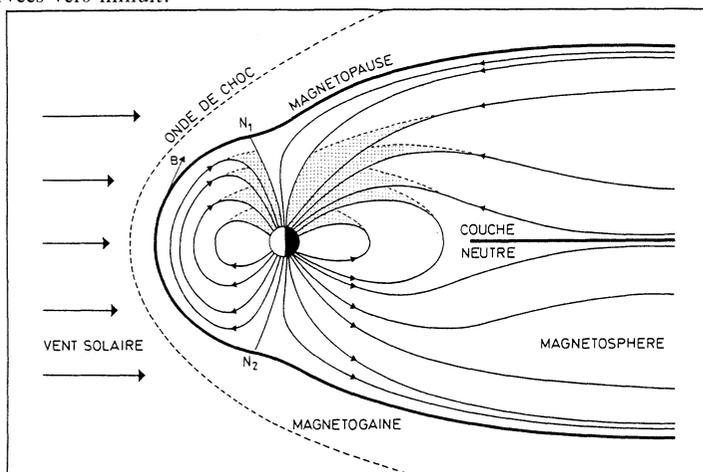
Au-delà d'une certaine altitude critique, la fréquence des chocs entre les particules chargées de l'ionosphère est si faible que ces particules peuvent parcourir de grandes distances sans subir de nouvelles collisions. Les mouvements des particules sont alors déterminés uniquement par les champs gravifique et magnétique terrestres et éventuellement par la présence de champs électriques. Ce niveau critique au-delà duquel les collisions entre particules chargées sont négligeables, se situe à une altitude variant entre 2.000 et 3.000 km, et constitue l'exobase ionique.

Comme le champ magnétique restreint les possibilités de mouvement des particules chargées issues de l'exobase en les contraignant à s'enrouler autour de ses lignes de force, on conçoit aisément que ces ions et ces électrons soient en quelque sorte piégés dans le champ magnétique terrestre et qu'ils soient ainsi capables de remplir l'espace contrôlé par ce champ. C'est en étudiant la propagation d'ondes radioélectriques de très basse fréquence que Storey montra, en 1953, que la concentration des électrons atteignait effectivement des valeurs élevées, de l'ordre de 500 particules par  $\text{cm}^3$ , à des distances aussi éloignées du centre de la Terre que trois rayons terrestres, dans le plan équatorial. Ces valeurs s'avéraient supérieures à celles prévues par la loi de Pascal de l'équilibre barométrique pour laquelle la décroissance devait être exponentielle au-delà du maximum d'ionisation, vers 300 km d'altitude. Ce résultat montrait, pour la première fois, l'existence d'une nouvelle région de l'environnement spatial de la Terre, à l'intérieur de laquelle les particules chargées issues de l'ionosphère n'obéissaient plus aux lois de la théorie classique des gaz soumis aux collisions, mais se comportaient essentiellement comme un plasma baignant au sein du champ géomagnétique. On désigne cette région sous le nom de *magnétosphère*. Elle correspond à l'espace entourant notre planète, dont la limite inférieure est l'exobase ionique et qui s'étend jusqu'au plus profond des zones contrôlées par le champ magnétique terrestre. Le plasma magnétosphérique est formé principalement d'hydrogène ionisé, d'origine ionosphérique. Nous verrons plus loin que ce plasma comprend également une composante d'origine solaire.

(1) La latitude dipolaire est définie par rapport à l'équateur magnétique dont le plan est perpendiculaire à l'axe du dipôle géomagnétique. Dans l'approximation d'un dipôle centré, cet axe perce la surface du globe en deux points diamétralement opposés. Ces points sont appelés pôles dipolaires ou géomagnétiques. La latitude dipolaire est positive au nord de l'équateur magnétique et négative au sud. A cause de la variation séculaire du champ géomagnétique, les coordonnées géographiques des pôles dipolaires se réfèrent à une époque déterminée. Ainsi, en 1985, les coordonnées du pôle nord géomagnétique (dans l'approximation du dipôle centré) étaient  $79,0^\circ$  N et  $70,9^\circ$  W. Ce point se déplace actuellement vers le Nord de  $0,05^\circ$  par an, sans déviation longitudinale (d'après J. Rassin, communication personnelle).

La structure de la magnétosphère est contrôlée par l'interaction du vent solaire avec le champ géomagnétique. Cette interaction (voir figure) conduit à la création d'une cavité magnétique dont la frontière est appelée magnétopause. Du côté jour, un modèle théorique idéalisé prévoit que la magnétopause doit posséder deux points neutres ( $N_1$  et  $N_2$ ) où le champ magnétique s'annule. De ces points, il doit émaner une infinité de lignes de force qui recouvrent la totalité de la magnétopause. La présence du champ magnétique interplanétaire modifie quelque peu la prévision de ce modèle théorique. En effet, l'observation montre que, dans la région des points neutres, le champ magnétique est très faible et fluctue sans cesse. Les cornets polaires désignent alors les ouvertures polaires centrées sur les hypothétiques points neutres, par lesquelles le plasma du vent solaire a un accès aisé aux régions polaires. Les particules du vent solaire qui pénètrent par les cornets polaires entrent en collision avec la haute atmosphère et y engendrent les aurores dites de jour. En effet, on a montré que ces aurores sont engendrées sur la section de l'ovale auroral allant de 8 h à 16 h de temps local. A cause de l'éclat du ciel, les aurores de jour ne sont pas visibles, sauf pendant l'hiver polaire. Dans ce cas, elles n'atteignent cependant pas l'éclat spectaculaire des aurores de nuit. Les aurores de jour sont typiquement des aurores de haute altitude. En effet, les électrons du vent solaire, qui s'engouffrent dans les cornets polaires, n'ont pas assez d'énergie ( $E < 1$  keV) pour leur permettre d'atteindre des altitudes inférieures à 300 km. L'aurore de jour est généralement rouge, puisqu'aux altitudes élevées, ce sont les raies du doublet ( $^3P - ^1D$ ) de l'atome d'oxygène qui dominant (voir encadré *L'aurore en tant que phénomène géophysique*).

Les particules du vent solaire ne pénètrent pas seulement dans la magnétosphère par les cornets polaires. Par suite de divers mécanismes (pas encore parfaitement compris) dont l'efficacité est d'autant plus grande que le Soleil est plus agité, une fraction de ces particules parvient à pénétrer par la queue de la magnétosphère. L'énergie typique des électrons est alors de l'ordre de 1 keV. Sous l'influence d'un champ électrique à grande échelle, ces particules refluent ensuite vers la Terre. Ce mouvement de reflux s'accompagne d'un accroissement de leur énergie et se poursuit jusqu'à une distance radiale de l'ordre de 6 à 8 rayons terrestres où les particules se heurtent alors au champ dipolaire de la Terre. A ce moment, l'énergie des électrons est voisine de 10 keV (une valeur typique de l'énergie des électrons auroraux). Sous l'effet de perturbations électriques et magnétiques, une partie des particules diffuse dans la magnétosphère interne (il s'agit principalement de protons) et donne naissance au courant annulaire qui encercle la Terre, entre 2,5 et 8 rayons terrestres. Par contre, une majorité d'électrons est précipitée le long des lignes de force qui aboutissent sur la section nocturne de l'ovale auroral, donnant ainsi naissance aux aurores de nuit. A cause de l'énergie accrue de ces électrons, ces aurores sont beaucoup plus intenses que celles qui se produisent de jour. D'ailleurs, les aurores les plus brillantes sont en général observées vers minuit.



▲ Figure: Illustration schématique de la cavité magnétosphérique dans le méridien midi-minuit. Le Soleil est sur la gauche de la figure. Le vent solaire «pousse» sur les lignes de force du champ magnétique terrestre, qui sont comprimées du côté jour et étirées du côté nuit. A la magnétopause, les électrons et les ions du vent solaire sont défléchis en sens opposés. Les courants électriques qui en résultent créent un champ magnétique affaiblissant considérablement le champ géomagnétique à l'extérieur de la cavité, le renforçant à l'intérieur. Ces courants s'écoulent dans la magnétopause et se referment dans la couche neutre. En période d'activité solaire modérée, le point de la magnétopause le plus proche de la Terre est situé à quelque dix rayons terrestres du centre de la planète, dans la direction du Soleil; l'onde de choc se situant aux environs de 15 rayons terrestres. A l'arrière, la magnétosphère s'étend sur plusieurs centaines de rayons terrestres, prenant plus ou moins la géométrie d'une queue de comète.

aurorale est de 0,1, soit en moyenne une aurore tous les 10 ans. Par contre, la fréquence d'occurrence maximale, se produisant - par définition - dans la «zone aurorale», atteint 250.

On remarque que la zone aurorale des régions arctiques traverse l'Alaska et le Nord canadien, la pointe sud du Groenland, la côte Nord de la Norvège et une partie de l'URSS. Les courbes d'égale fréquence de la figure 1 sont approximativement des cercles, dont le centre est un point situé au Nord-Ouest du Groenland, à quelque 1.400 km du pôle magnétique. Ce point définit en réalité l'axe du dipôle géomagnétique (la différence entre l'emplacement du pôle magnétique, défini comme le lieu où le champ est vertical, et le point de percée de l'axe du dipôle est une conséquence de l'approximation dipolaire. Au sol, le champ dipolaire diffère du champ moyen vrai; par contre, il se rapproche beaucoup du champ vrai dans les zones proches de la magnétosphère). La zone aurorale entoure l'axe du dipôle, à une distance de l'ordre de  $23^\circ$  (soit à  $67^\circ$  de latitude dipolaire).

Dans l'hémisphère sud, la fréquence d'occurrence de l'aurore australe est, de façon similaire, fonction de la distance de l'observateur au point de percée sud du dipôle. L'aurore australe est rarement visible dans les régions habitées, car l'Amérique du Sud et l'Australie sont trop éloignées du pôle Sud. C'est pourquoi, l'aurore australe ne fut décrite qu'en 1773, lorsque le célèbre navigateur anglais, le capitaine James Cook, en observa plusieurs au cours d'un de ses périple dans les mers du Sud.

### L'ovale auroral

La zone aurorale est définie de manière statistique comme étant la région de probabilité maximale d'apparition des aurores. Cette zone ne reflète en aucun cas la distribution instantanée des aurores. Pour tracer cette distribution, il aura fallu attendre le développement de techniques modernes de photographie des aurores. Ainsi, la caméra «ciel entier» (all-sky camera) fut mise au point dans l'immédiat après-guerre afin de photographier le ciel dans sa totalité. Le principe de cet instrument, toujours utilisé actuellement, est très simple: un miroir convexe réfléchit la lumière du ciel et une caméra filme l'image ainsi renvoyée par le miroir.

Au cours de l'Année Géophysique Internationale 1957-1958, 114 caméras de ce type furent disposées dans les régions arctiques et antarctiques. De plus, l'Auroral Data Center de l'Université Cornell (Etats-Unis) recevait mensuellement quelque 18.000 heures d'observation provenant de 430 observateurs amateurs, parmi lesquels notamment des pilotes d'avion et des marins. Toutes ces données furent analysées à l'échelle internationale, en particulier les centaines de milliers

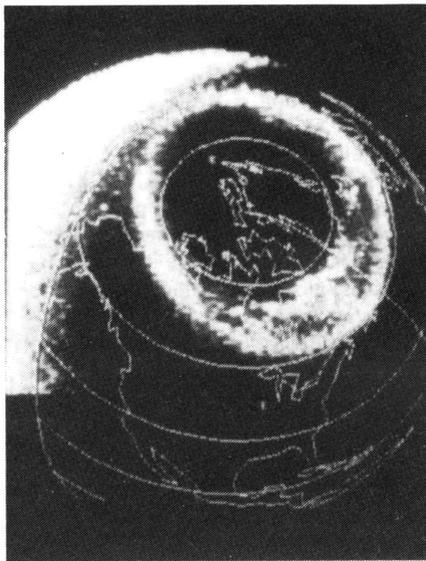
de photographies provenant des caméras «ciel entier». A partir de cette analyse, le soviétique Feldstein montra, en 1963, que le lieu d'apparition instantanée des aurores est une bande en forme d'ovale, encerclant le point de percée de l'axe du dipôle géomagnétique. L'ovale est excentré par rapport au dipôle et son centre est déplacé de quelque  $3^\circ$  vers l'hémisphère non éclairé.

Le concept d'ovale auroral est totalement différent de celui de zone aurorale. En effet, la zone aurorale se déduit de la *distribution statistique des aurores*. Elle ne dépend donc pas de l'heure locale et la carte de la figure 1 n'est qu'une distribution géographique statistique des aurores observées dans l'hémisphère nord. L'ovale auroral est le lieu d'apparition instantanée des aurores. Celui-ci est pratiquement fixe par rapport au plan s'appuyant sur l'axe Terre-Soleil et sur l'axe du dipôle magnétique terrestre. Son centre est plus proche de l'axe du dipôle que du pôle géographique. Ainsi, à cause de la rotation terrestre, la position relative d'une région par rapport à l'ovale varie avec l'heure locale : en période d'activité magnétique modérée, l'ovale est localisé, à minuit, entre  $67^\circ$  et  $75^\circ$  de latitude dipolaire, tandis qu'à midi, il est plus proche de l'axe du dipôle, se situant alors entre  $76^\circ$  et  $78^\circ$ .

Le concept d'ovale auroral permet également d'expliquer la répartition statistique maximale des aurores dans la zone aurorale. En effet, les aurores les plus intenses sont le plus fréquemment observées vers minuit<sup>(2)</sup>. La zone aurorale recouvre donc les régions qui, au cours d'une rotation terrestre, passent vers minuit de temps local sous la partie la plus brillante de l'ovale.

Depuis quelques années, les observations du satellite Dynamics Explorer 1 ont confirmé de façon éclatante l'existence des ovales auroraux (il y a bien entendu un ovale auroral dans chaque hémisphère). En effet, puisque l'apogée de ce satellite est située à près de 5 rayons terrestres du centre de la Terre, il est possible de photographier l'ovale dans sa totalité. La figure 2 est l'une des premières images de l'ovale auroral nord transmise par Dynamics Explorer 1 et captée par un photomètre opérant dans le domaine ultraviolet. Cet instrument fut réalisé par l'équipe du professeur Frank de l'Université d'Iowa (USA). La bande passante du photomètre s'étend dans ce cas de 123 à 165 nm. Dans cette partie du spectre, les émissions aurorales correspondent aux transitions de l'atome d'oxygène à environ 130,4 et 135,6 nm. Celles-ci rivalisent en intensité avec les émissions de l'hémisphère éclairé, dans la partie supérieure gauche de l'image.

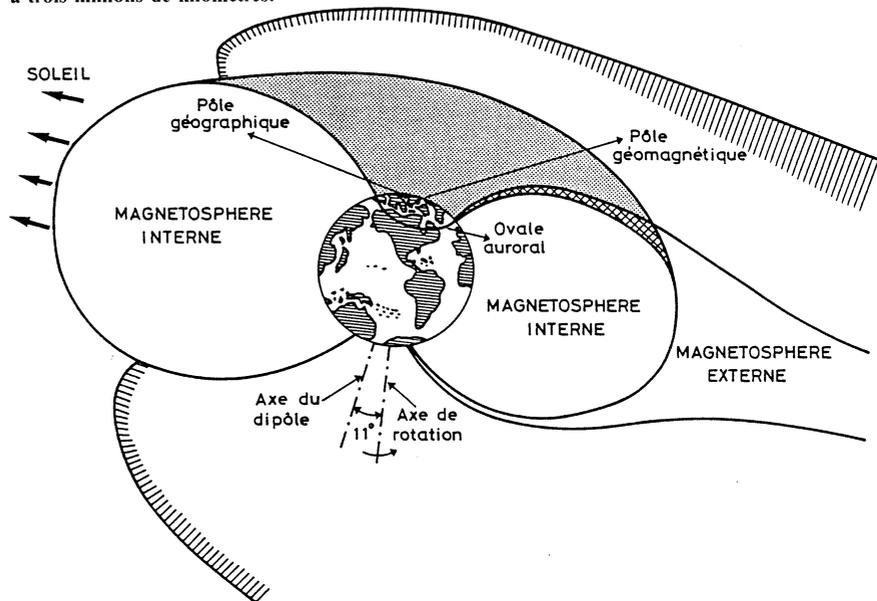
(2) Pour des raisons qu'il serait trop long d'exposer ici, et qui sont liées, d'une part, à la géométrie de la magnétosphère et, d'autre part, à des instabilités de plasma se développant dans la queue magnétosphérique.



▲ Figure 2. Vue de l'ovale auroral après l'arrivée à 1 UA d'un choc du milieu interplanétaire. Image transmise par le satellite Dynamics Explorer 1, le 8/11/1981 à 2h41UT, et captée par un photomètre opérant dans le domaine UV. [Cliché aimablement communiqué par L. Frank, Université d'Iowa, USA].

A l'intérieur de l'ovale, d'intenses émissions aurorales sont observées à toute heure locale. L'ovale de cette image ne correspond pas à une période de calme magnétique, l'observation photométrique ayant débuté 1 h 35

▼ Figure 3. Dans chaque hémisphère, l'ovale auroral définit la distribution des aurores à un instant donné. En première approximation, les ovales restent fixes par rapport au plan s'appuyant sur l'axe Terre-Soleil et sur l'axe du dipôle magnétique terrestre. Par contre, comme l'axe de rotation de la Terre est incliné de  $11^\circ$  par rapport à l'axe du dipôle, les ovales ne restent pas fixes dans un système de coordonnées géographiques, la latitude de leur position variant continuellement au cours de la rotation terrestre. Les ovales auroraux sont les projections dans la haute atmosphère de la zone de transition entre deux régions distinctes de la magnétosphère : la première est la magnétosphère interne où le champ magnétique terrestre reste à peu près dipolaire jusqu'à des distances équatoriales de l'ordre de 4 à 6 rayons terrestres ; la seconde est la magnétosphère externe où le champ magnétique s'écarte très fort d'une structure dipolaire. Dans la première région, les lignes de force sont fermées, tandis que dans la seconde région, elles s'étirent très loin dans la queue magnétosphérique, sur une distance supérieure à trois millions de kilomètres.



après l'arrivée à proximité de la Terre d'une onde de choc du milieu interplanétaire.

### L'ovale auroral et la magnétosphère

La figure 3 montre que l'atmosphère supérieure des régions polaires est connectée à la magnétosphère externe par des lignes de force ouvertes (voir encadré *La magnétosphère*). En fait, la magnétosphère se divise en deux parties : la magnétosphère interne, qui renferme les particules énergétiques des ceintures de radiation, piégées par les lignes de force fermées à structure dipolaire, et la magnétosphère externe traversée par des lignes de force ouvertes issues des régions polaires et «soufflées» par le vent solaire. A la frontière entre ces deux régions, des particules chargées sont continuellement accélérées. Certaines sont capables de pénétrer profondément dans l'atmosphère supérieure, guidées par les lignes de force de la région frontière. C'est l'interaction de ces particules avec l'atmosphère qui produit l'aurore. L'ovale auroral apparaît ainsi comme la projection sur l'ionosphère terrestre de la frontière séparant la magnétosphère interne de la magnétosphère externe. Puisque le vent solaire déforme considérablement les lignes de force externes du champ géomagnétique, la magnétosphère est asymétrique par rapport à l'axe du dipôle. C'est la raison pour laquelle l'ovale auroral n'est pas un cercle de latitude dipolaire constante.

### L'aurore en tant que phénomène géophysique: Comment se forme-t-elle? Quelle coloration peut-elle prendre?

Une aurore est un phénomène lumineux qui se produit dans la haute atmosphère. L'altitude typique de ce phénomène varie entre 100 et 150 km. Des aurores peuvent cependant être observées à d'autres altitudes. Ainsi, elles descendent parfois jusqu'à 70 km ou au contraire s'élèvent à plus de 250 km.

Le phénomène lumineux qui accompagne l'aurore est typique d'une décharge électrique dans un gaz. Ce gaz est ici la haute atmosphère, tandis que la décharge électrique est produite par des électrons du vent solaire (aurores d'électrons). Ces électrons du vent solaire, après avoir pénétré dans la queue magnétosphérique (voir encadré *La magnétosphère*) refluent vers la Terre et se heurtent alors au champ magnétique dipolaire. Ces électrons, guidés par les lignes de force du champ géomagnétique, finissent par précipiter dans l'ionosphère des régions polaires (ou dans l'ionosphère des régions de latitude moyenne en période de très forte activité magnétique). Ces électrons possèdent suffisamment d'énergie ( $E \sim 1$  à  $10$  keV) pour ioniser et exciter les atomes ou molécules de la haute atmosphère.

Le spectre des aurores contient des raies d'émission atomiques et des bandes d'émission moléculaires (provenant essentiellement de l'oxygène et de l'azote sous forme atomique ou moléculaire). Dans le domaine visible, l'émission la plus intense correspond à la raie verte à 557,7 nm de l'atome d'oxygène (transition  $^1D - ^1S$ ). Cette émission confère à l'aurore sa coloration habituelle (verte), observée entre 100 et 150 km d'altitude. L'intensité de cette émission est maximale à 120 km. Puisque l'état excité donnant lieu à cette transition est un état métastable d'une durée de vie de 0,74s (alors que la durée de vie de niveaux normaux est de l'ordre de la nanoseconde), cet atome (excité par les électrons auroraux) se désexcitera en émettant de la radiation seulement si l'intervalle moyen entre deux collisions atomiques est supérieur à 0,74 s. En effet, lors d'une collision, l'énergie d'excitation d'un état métastable est transférée sous forme d'énergie cinétique: elle se transforme donc en chaleur, et non en énergie lumineuse. Entre 100 et 150 km d'altitude, les collisions sont suffisamment rares (moins d'une collision par seconde) pour que la transition  $^1D - ^1S$  de l'atome d'oxygène puisse se produire.

D'autres émissions sont également observées entre 100 et 150 km d'altitude. Ainsi, les transitions de l'azote moléculaire ionisé  $N_2^+$  donnent lieu (dans le domaine visible) à des émissions bleues correspondant au premier système négatif de  $N_2^+$ . Ces émissions bleues sont cependant moins intenses que l'émission verte à 557,7 nm de l'atome d'oxygène. Comme pour cette dernière, leurs intensités sont maximales à 120 km.

Les aurores de haute altitude (au-dessus de 250 km) ont une coloration rouge. Celle-ci est due aux transitions à 630,0 et 636,4 nm du doublet  $^3P - ^1D$  de l'atome d'oxygène, dont la durée de vie du niveau excité est fort longue (110 s). Au-dessus de 250 km, c'est la raréfaction croissante de l'atmosphère qui permet, par la diminution de la fréquence des collisions inter-atomiques, à ces transitions «interdites» (dans les conditions du laboratoire) de se produire.

Divers systèmes de bandes moléculaires caractérisent le spectre des aurores de basse altitude (en dessous de 90 km). Dans le domaine visible, les transitions les plus intenses sont toutes «permises» (par opposition aux transitions «interdites» dont il a été question ci-dessus). Les émissions correspondent:

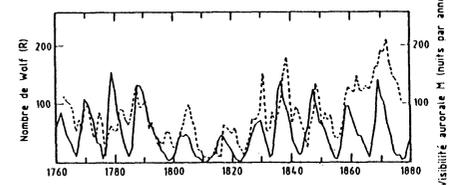
- 1) au premier système positif de l'azote moléculaire ( $N_2$ ), dont les émissions correspondantes ont une coloration rouge;
- 2) au second système positif de  $N_2$ ; ces émissions, moins intenses que les précédentes, ont une coloration bleue.

Les diverses couleurs aurorales dépendent en fin de compte de la nature et de la concentration des molécules ou des atomes qui constituent la haute atmosphère, et dont la répartition est fonction de l'altitude. Comme décrit ci-dessus, les émissions visibles les plus intenses sont dans le domaine spectral correspondant au vert, au rouge et au bleu. C'est pourquoi, ces trois couleurs fondamentales provenant d'altitudes différentes peuvent, en se mélangeant, donner une fantastique féerie de couleurs comprenant des teintes mauve, pourpre ou rose que l'on aperçoit effectivement dans les structures aurorales complexes.

L'altitude des aurores est déterminée par l'énergie des électrons primaires. Les électrons de faible énergie ne peuvent pénétrer profondément dans l'atmosphère et déposent leur énergie au-dessus de 250 km, produisant alors les aurores de haute altitude, dont la couleur rouge est caractéristique du doublet 630/636,4 nm de l'oxygène atomique. Par contre, les électrons les plus énergétiques ( $E \sim 10$  keV) peuvent pénétrer très bas dans l'atmosphère, jusqu'à 70 km d'altitude. Ils atteignent ainsi l'homosphère, essentiellement moléculaire, ce qui explique les émissions du premier système positif de  $N_2$  et la coloration rouge du bord inférieur des aurores qu'ils y engendrent. Il existe une grande variété de formes aurorales (arcs, bandes, draperies, ...). L'*International Auroral Atlas* (1963) donne une excellente classification de ces différentes formes. Mentionnons seulement que les rayons que l'on observe dans les draperies visualisent les lignes de force du champ magnétique le long desquelles les électrons solaires précipitent.

## II. Le déplacement des ovales

A la fin du 19<sup>e</sup> siècle, un géophysicien norvégien, Tromholt, avait remarqué que la fréquence d'apparition des aurores était étroitement corrélée avec le nombre de taches solaires. La figure 4 illustre cette corrélation. Un siècle d'observations aurorales sur l'ensemble de la Scandinavie fut répertorié par Tromholt afin d'établir la courbe de fréquence aurorale représentée par la ligne en pointillés de la figure 4. On constate que la fréquence d'occurrence aurorale suit étroitement le cycle de l'activité solaire. Egedal, qui étudia les détails de cette corrélation, trouva que les manifestations aurorales s'intensifiaient fréquemment environ un jour après le passage d'un grand groupe de taches au méridien central du Soleil. Il s'agissait d'une dépendance similaire à celle trouvée par Maunder pour les grands orages magnétiques.



▲ Figure 4. Corrélation entre la fréquence d'occurrence aurorale M (courbe en pointillés) et le nombre de Wolf R (courbe en trait plein). Les observations aurorales sont relatives à l'ensemble de la Scandinavie. On remarque que les maxima de M suivent les maxima de R. Ces maxima sont en général décalés d'un an ou deux. Ce décalage est probablement lié à la forme du diagramme «papillon» du cycle des taches solaires. En effet, les taches apparaissent après le maximum d'un cycle sont situées plus près de l'équateur solaire, ce qui tend à concentrer les jets rapides du vent solaire, issus des centres actifs, dans le plan de l'écliptique.

[D'après S. Tromholt: *Catalog der in Norwegen bis Juni 1878 beobachteten Nordlichter* - Oslo: Dybwad, 1902].

En réalité, la latitude des ovales auroraux varie considérablement avec le degré d'agitation magnétique. Pendant les périodes de grand calme magnétique ( $K_p = 0$  pendant environ 24 heures<sup>(3)</sup>), l'ovale auroral se contracte en direction du pôle. L'ovale se trouve à son emplacement moyen lorsque  $K_p = 3$ . Une augmentation de l'activité magnétique ( $K_p > 3$ ) est alors associée au déplacement de l'ovale vers l'équateur. Pendant les orages

<sup>(3)</sup> Plusieurs indices ont été définis pour représenter par un nombre simple le degré moyen d'agitation magnétique. Parmi ceux-ci, l'indice planétaire  $K_p$  résulte d'une moyenne, pondérée sur une trentaine d'observatoires répartis à la surface du globe, de l'amplitude des variations magnétiques mesurées par intervalles de 3 heures. L'indice  $K_p$  varie dans une échelle de 0 à 9, l'indice 0 correspondant au calme magnétique et l'indice 9 aux orages magnétiques les plus intenses.

magnétiques les plus intenses (voir encadré *Quelques conséquences géophysiques d'une éruption solaire* pour la description de l'orage magnétique), le secteur nocturne de l'ovale peut migrer jusqu'à une latitude dipolaire inférieure à 50°.

Au cours d'un orage magnétique intense, la structure de la magnétosphère est profondément modifiée. En particulier, le courant annulaire (ring current) s'intensifie. Ce courant est constitué en grande partie de protons d'énergie cinétique comprise entre 20 et 200 keV<sup>(4)</sup>, piégés par le champ géomagnétique. Il s'étend dans le plan équatorial de la magnétosphère, entre 2,5 et 8 rayons terrestres. La perturbation magnétique associée à l'intensification du courant annulaire déforme le champ magnétique ambiant sur une grande échelle. A l'échelle mondiale, on observe alors une décroissance considérable de la composante horizontale (H) du champ magnétique. Le champ à structure dipolaire de la magnétosphère interne s'affaiblit donc, ce qui entraîne un rétrécissement de cette région magnétosphérique au détriment de la magnétosphère externe (voir figure 3). La frontière entre ces deux régions migre vers l'équateur, et avec elle, l'ovale auroral.

<sup>(4)</sup> L'électron-volt (eV) est une unité d'énergie utilisée pour les particules atomiques, et s'applique généralement à l'énergie cinétique de ces particules (c'est précisément l'énergie cinétique acquise par un électron après avoir été accéléré par une différence de potentiel électrique de 1 V : 1eV = 1,602 × 10<sup>-19</sup>J). Ainsi, un proton de 100 keV d'énergie cinétique se déplace à la vitesse de 4.400 km/s.

### Quelques conséquences géophysiques d'une éruption solaire

**PCA = Polar Cap Absorption**: absorption, dans les calottes polaires, du bruit radio de longueur d'onde 10 m. Un PCA résulte d'une augmentation de la densité électronique de la région D de l'ionosphère polaire, causée par l'arrivée de protons solaires, d'énergie variant de 1 à 100 MeV. Une augmentation de la densité ionosphérique provoque une absorption accrue des ondes radioélectriques décimétriques utilisées pour les télécommunications à grande distance.

**orage magnétique**: variations intenses, à caractère mondial, de toutes les composantes du champ magnétique terrestre. En dehors des régions polaires, un orage typique comprend trois phases successives:

(i) La phase initiale, caractérisée par une augmentation brutale de la composante horizontale (H) du champ magnétique. Cette phase ne dure que quelques heures. Elle est provoquée par la compression de la cavité magnétosphérique, à la suite de l'arrivée à 1 UA de l'onde de choc produite par une éruption solaire;

(ii) la phase principale, caractérisée par une profonde dépression de la composante H, pouvant atteindre plusieurs centaines de nT. La dépression est maximale après environ 1 jour. C'est l'augmentation de l'intensité du courant annulaire qui est à l'origine de cette phase.

(iii) la phase de recouvrement, pendant laquelle le champ revient progressivement à sa valeur normale. Cette phase peut durer plusieurs jours. C'est la lente diminution de l'intensité du courant annulaire qui est à l'origine de cette phase.

Il faut noter cependant que, dans les régions aurorales (et aussi dans les calottes polaires), les variations de champ magnétique sont assez différentes de celles décrites ci-dessus. En effet, il faut alors tenir compte des intenses courants électriques associés aux électrons auroraux.

**ssc = storm sudden commencement**: début de la phase initiale d'un orage magnétique caractérisé par une augmentation brusque, pratiquement simultanée en chaque point du globe, de la composante horizontale (H) du champ magnétique. L'augmentation typique de H est de quelques dizaines de nanoTesla (l'intensité moyenne du champ magnétique terrestre étant de 4,8x10<sup>-5</sup> Tesla).

**Décroissance Forbush**: diminution sensible du nombre de rayons cosmiques galactiques arrivant à la surface de la Terre. Elle est mise en évidence par des enregistrements au sol de la composante neutronique du rayonnement cosmique - voir aussi l'article de C. et R. Gonze, J.C. Jodogne et A. Koeckelenbergh dans *Ciel et Terre*, vol. 95, n°2, pp. 91-99, mars-avril 1979).

## III. Chronologie des événements en relation avec l'aurore du 13 mars 1989

L'aurore du 13 mars 1989 s'inscrit dans une période d'activité solaire intense (du 6 au 17 mars) pendant laquelle de violentes éruptions se sont succédées. Le Tableau I énumère la succession de ces événements, à partir du 6 mars, ainsi que leurs caractéristiques.

A propos de ces événements exceptionnels, il est intéressant de reprendre ci-après le résumé de l'ursigramme (U.R.S.I. = International Union of Radio Science, fondée en 1919) en provenance de l'Observatoire de Meudon, en date du 15 mars (pour la terminologie, voir l'encadré *Quelques conséquences géophysiques d'une éruption solaire*): «Un centre très actif, complexe et étendu (environ 50 fois aussi large que la Terre), est apparu le 6 mars au limbe Nord-Est du Soleil, et a donné lieu à une éruption majeure qui a atteint son maximum ce même jour à 14h05 UT. Durant le reste de la semaine (du 7 au 11 mars), ce centre a produit de nombreuses autres éruptions majeures (dans le domaine des rayons X: 5 de classe X et 34 de classe M) et est resté très actif et très complexe.

**Un événement à protons a débuté le 8 mars à 17 h 35 UT. Le flux de protons à 1 UA (exprimé en nombre de particules par cm<sup>2</sup>, par seconde et par stéradian), d'énergie supérieure à 10 MeV, a atteint un maximum de 51 le 8 mars à 17 h 55 UT, un maximum de 270 le 10 mars à 9 h 20 UT et un maximum de 3.500 le 13 mars à 6 h 45 UT. Cet événement à protons a pris fin le 14 mars à 11 h 35 UT.**

**Un événement PCA a été observé le 9 mars. Le 9 mars, ce PCA est maximum à 21 h 30 UT (3,4 dB) tandis que le 13 mars, il est maximum à 8 h 00 UT (6dB).**

**Un ssc très marqué a été observé le 8 mars à 17 h 54 UT. Un second ssc est observé le 9 mars à 12 h 27 UT. Le 13 mars, un très violent orage magnétique a débuté à 1h28 UT (ssc très marqué).**

*Une aurore a été observée en France, en Belgique et aux Pays-Bas durant la nuit du 13 au 14 mars entre approximativement 21 h 25 UT et 1 h 00 UT»*

Le résumé de l'ursigramme du 22 mars est

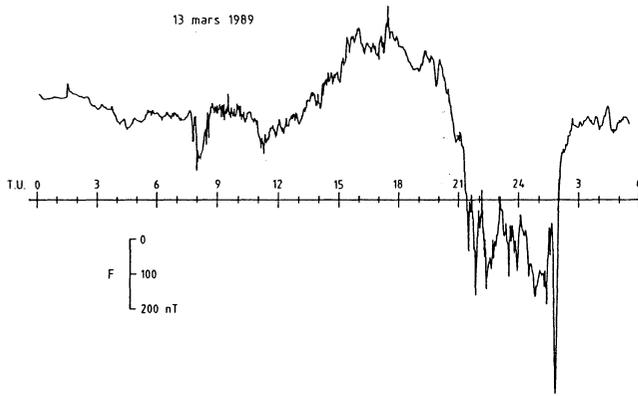
également intéressant: «Le centre actif exceptionnel qui a donné lieu à de nombreuses éruptions majeures la semaine dernière (soit du 6 au 11 mars) a continué à être très productif (5 éruptions de classe X et 22 de classe M). Il a traversé le limbe ouest du Soleil le 19 mars.

**Un événement à protons a débuté le 17 mars à 18 h 55 UT (flux maximum ce même jour à 21 h 40 UT: 370 particules par cm<sup>2</sup>, par seconde et par stéradian, d'énergie supérieure à 10 MeV). Le 18 mars, le flux maximum (2.000 particules) a été atteint à 9 h 20 UT. Cet événement à protons s'est terminé le 20 mars à 17 h 20 UT.**

**Le PCA qui avait commencé le 9 mars à 21 h 30 UT s'est terminé le 20 mars à 6 h 00 UT.**

**Une décroissance Forbush de 13% est observée le 13 mars à 21 h 00 UT.**

**Le niveau de l'activité géomagnétique est exceptionnel le 13 et le 14 mars. Deux ssc sont observés: le 16 mars à 5 h 32 UT et le 19 mars à 4 h 23 UT».**



▲ Figure 5. Variation de l'intensité (F) du champ magnétique terrestre enregistrée au Centre de Physique du Globe de Dourbes (IRM), du 13 mars 1989 à 0h UT au 14 mars à 5h UT. La longueur de la barre verticale, placée à gauche de la figure, représente une variation de 200 nT. [Figure aimablement communiquée par G. Simon]

La figure 5 illustre la variation de l'intensité (F) du champ magnétique enregistrée à Dourbes à partir du 13 mars à 0 h UT jusqu'au lendemain à 5 h UT. Le ssc du 13 mars, mentionné dans l'ursigramme daté du 15, est bien visible à 1 h 28 UT. En effet, on remarque à cet instant une augmentation brutale de l'intensité du champ d'environ 30nT. Vers 17 h 30 UT, le champ passe par un maximum. A partir de cet instant, il décroît pour atteindre une valeur minimale, le 14 vers 2 h UT. L'écart entre ces deux

extrema est exceptionnel: 1.114 nT! Cet écart représente 2,5% de l'intensité du champ dipolaire à la latitude de Dourbes (Dans l'approximation dipolaire, le champ à Dourbes aurait une intensité égale à  $4,4 \times 10^{-5}T$ ). De plus, la croissance très rapide du champ qui suit le minimum atteint le 14 est également exceptionnelle: 685 nT en 15 minutes! C'est la variation la plus rapide enregistrée à Dourbes depuis 1952. Pendant l'intervalle de temps considéré sur la figure 5, les autres composantes du champ

Tableau I.

Eruptions solaires (solar flares)

Date	Début (UT)	Maximum (UT)	Fin (UT)	X / Opt	Localisation	Flux à 10 cm
06/03	13.13	14.05	20.35	X15/3b	N30E67	18000
07/03	14.49	14.58	15.09	X1.8/2b	N32E65	180
09/03	15.23	15.38	16.38	X4/4b	N30E38	80
10/03	18.58	19.22	01.37	X4.5/3b	N31E22	12000
11/03	19.33	19.38	20.18	X1.3/2b	N27E10	220
13/03	02.57	03.27	04.23	X1.2/3n	N28W02	380
14/03	16.50	17.31	18.16	X1.1/2b	N33W21	730
15/03	06.23	06.52	10.25	M4.8/1f	N34W35	620
15/03	16.48	16.54	18.38	M8.4/2b	N31W40	2400
16/03	15.22	15.27	17.17	X3.6/2b	N36W47	9300
16/03	20.37	20.45	22.02	X1.4/1b	N29W60	78
17/03	02.14	02.47	03.53	M2.5/3m	N31W72	75
17/03	07.14	07.19	08.32	M6.8/2b	N32W59	630
17/03	17.20	17.44	18.56	X6.5/2b	N33W60	3100

Caractéristiques des éruptions solaires qui se sont produites du 6 au 17 mars 1989 (d'après les données communiquées par A. Koeckelenbergh, SUNSPOT INDEX DATA CENTER, Observatoire Royal de Belgique).

A la surface du Soleil, un événement est localisé par sa latitude (en degrés, N pour Nord, S pour Sud) par rapport à l'équateur et par sa longitude (en degrés, E pour Est, W pour Ouest) par rapport au méridien central. L'unité de flux radio à 10 cm est  $10^{-22}W m^{-2} Hz^{-1}$ .

La cinquième colonne caractérise l'importance des émissions X et H $\alpha$ . La partie gauche de cette colonne (notée X) souligne l'intensité maximale ( $I_{max}$ ) du rayonnement X lorsque la longueur d'onde de ce rayonnement est comprise entre 0,1 et 0,8 nm. La classe M caractérise les éruptions pour lesquelles  $10^{-2} \leq I_{max} (erg cm^{-2} s^{-1}) \leq 9 \times 10^{-2}$ , tandis que la classe X est caractérisée par  $I_{max} \geq 10^{-1} erg cm^{-2} s^{-1}$ . A droite des symboles M et X, on peut lire la valeur de  $I_{max}$  (pour la classe M, l'unité est  $10^{-2} erg cm^{-2} s^{-1}$ . Elle vaut  $10^{-1} erg cm^{-2} s^{-1}$  pour la classe X). La partie droite de la colonne 5 (notée Opt) est un indice double caractérisant l'importance de l'émission H $\alpha$  ( $\lambda = 656,2 nm$ ): l'aire ( $A_d$ ) de l'éruption H $\alpha$  (unités de  $A_d$ ; un millièmième de la surface du disque solaire) est représentée par les symboles S ( $A_d < 200$ ), 1 ( $200 \leq A_d < 500$ ), 2 ( $500 \leq A_d < 1.200$ ), 3 ( $1.200 \leq A_d \leq 2.400$ ) et 4 ( $A_d > 2.400$ ). L'intensité de l'émission est évaluée à l'aide des symboles f (faible), n (normale) et b (brillante).

ont également subi des variations exceptionnelles. Ainsi<sup>(5)</sup>, le 13 entre 15 h 30 UT et 23 h UT, la déclinaison a varié de  $2^{\circ}34'$ , tandis que l'inclinaison subissait un écart de  $59^{\circ}03''$  entre 21 h 45 UT (le 13 mars) et 1 h 40 UT (le 14 mars).

A la lumière de ces informations, le scénario le plus plausible permettant d'expliquer la présence d'une aurore dans notre ciel est le suivant:

- Suite à l'éruption solaire très intense (X15/3b) du lundi 6 mars à 14 h 05 UT, un orage magnétique a débuté le mercredi 8 mars (ssc à 17 h 54 UT), soit plus de 52 heures plus tard. Cet orage magnétique du mercredi 8 mars a provoqué le déplacement de l'ovale auroral vers l'équateur. Des aurores furent même observées à Chicago et à l'intérieur de l'Etat de New York, à une latitude dipolaire inférieure à  $55^{\circ}$  (M. M. Waldrop: Diary of a Solar Flare, Science, vol. 243, p.1436, 17 mars 1989).

- Suite à l'éruption du mardi 7 mars (X1.8/2b) à 14 h 58 UT, un ssc est observé le jeudi 9 mars à 12 h 27 UT alors que l'orage magnétique du mercredi 8 mars est probablement encore en période de recouvrement.

- Suite à l'éruption exceptionnelle du jeudi 9 mars (X4/4b) à 15 h 38 UT, elle-même suivie de deux autres éruptions moins intenses, le 10 et le 11 (voir tableau I), un très violent orage magnétique, se superposant probablement aux orages du 8 et du 9 (en phase de recouvrement), débute le 13 mars à 1 h 28 UT.

-Au cours de la phase principale de cet orage, le secteur nocturne de l'ovale se déplace vers l'équateur et une aurore est observée en Belgique.

Ce scénario demandera, bien sûr, à être confirmé lorsque toutes les données relatives aux événements solaires et géophysiques, pour la période du 6 au 17 mars, auront été rassemblées et analysées, en particulier celles concernant le champ magnétique.

<sup>(5)</sup> Les heures données ci-après sont approximatives

Remerciements. Les remarques judicieuses d'A. Jorissen ont fortement contribué à améliorer la clarté du texte. Les données du champ magnétique recueillies à Dourbes, les 13 et 14 mars, m'ont été aimablement communiquées par G. Simon. Je lui dois la figure 5. Enfin, les discussions que j'ai eues avec A. Koeckelenbergh, J.C. Jodogne et P. Cugnion m'ont aidé à faire un premier point sur les événements solaires et géophysiques mentionnés dans l'article. ■

NDLR: Dans le prochain numéro, nous fournirons plus de détails sur l'aurore du 13 mars 1989 et les phénomènes associés.