

I. Introduction

Depuis toujours les aurores polaires sont des phénomènes lumineux qui ont intrigué les hommes. Lorsque l'on a la chance de voir une aurore boréale, on est submergé par la beauté d'un tel phénomène. Comment la nature peut-elle créer un tel spectacle ? Depuis toujours les aurores polaires nous ont intrigués ; on a envie de comprendre ce qui se cache derrière les aurores boréales ou australes. Mais ce phénomène ne se manifeste que dans les régions de latitudes élevées. Les photographies, les films ne peuvent pas remplacer la réalité et l'émotion intense qu'elle suscite.

Quelques mythes et légendes rattachés aux aurores polaires :

- Pour les Inuits de la baie d'Hudson, les aurores sont des torches allumées par les esprits des morts déjà montés au paradis pour guider les nouveaux arrivants.
- Pour les esquimaux de l'est du Groenland, les aurores représentent les esprits des enfants morts à la naissance.
- Les Indiens Fox du Wisconsin (USA) pensaient que les aurores étaient les esprits de leurs ennemis morts au combat venus pour se venger.
- Les Indiens Menominee croyaient que les aurores étaient les torches allumées par des géants amicaux pour les guider dans leur pêche à la lance.

Les aurores polaires ont donc suscité la curiosité des hommes depuis très longtemps, mais ce n'est qu'à partir du XVII^e siècle qu'elles ont été étudiées scientifiquement. On ne sait précisément si c'est Galilée ou bien l'astronome français Pierre Gassendi qui fut le premier à utiliser le terme d'aurore boréale.

Au XVIII^e siècle, l'astronome britannique Edmond Halley avança que le champ magnétique terrestre serait un acteur de la formation des aurores boréales. On put observer en 1773 la 1^{ère} observation d'aurore australe dans l'océan Indien, ce qui vint confirmer la théorie de De Mairan comme quoi le phénomène était miroir, c'est-à-dire ce passait aux deux pôles. Le physicien norvégien Birkeland fut le premier à recréer une aurore en laboratoire en 1895. Au début du XX^e siècle, Kennelly et Heaviside ont mis en évidence l'existence de la ionosphère, la couche supérieure ionisée et donc conductrice de l'atmosphère terrestre. À partir de 1957, l'exploration spatiale a permis une meilleure connaissance des aurores polaires terrestres, mais aussi l'observation d'aurores polaires sur d'autres planètes comme Jupiter, Saturne et Mars.

Serait-il possible de reproduire ces aurores dans un laboratoire, avec du matériel de lycée ?

Avec du temps et de la patience, nous avons pu réaliser notre projet tout en simplifiant et améliorant certaines parties de l'expérience.

*Photo prise par le satellite Hubble en octobre 1997,
qui illustre la présence d'aurores sur Saturne.*

II. Explication du phénomène physique

A. Du Soleil jusqu'aux pôles

Selon la théorie actuelle, l'énergie nécessaire à la formation des aurores boréales provient du vent solaire, un flux de gaz qui s'échappent du Soleil à des vitesses supersoniques de 300 à 1000 km/s. Il arrive parfois qu'une intense activité du Soleil engendre des orages solaires. Lors d'un orage solaire, un afflux de particules chargées éjectées par le Soleil entre en collision avec le bouclier que constitue la magnétosphère. Des particules électrisées à haute énergie peuvent alors être captées et canalisées par les lignes du champ magnétique terrestre aboutir aux pôles. Ces particules excitent ou ionisent les atomes de la haute atmosphère, l'ionosphère. Excités, ces atomes vont alors libérer de l'énergie sous forme de photons, d'où l'observation du phénomène auroral. Pour comprendre le mécanisme à l'origine des aurores polaires, il est cependant nécessaire de distinguer les différents acteurs et étudier leur interaction.

I. Le vent solaire

1) Magnétisme solaire

Le Soleil ne dispose pas de champ magnétique global comme celui de la Terre. Selon nos connaissances, son magnétisme serait généré dans les taches sombres qui apparaissent à la surface solaires. Il existe une interface qui sépare la zone radiative de la zone convective de l'astre : la tacholine. C'est la variation de la vitesse des gaz dans cette zone de convection, qui serait à l'origine de la création des lignes de champ magnétique. Sous l'effet combiné de la pression et des mouvements de la matière, ces champs magnétiques perceraient la surface en formant des boucles qui désorganisent localement la surface solaire. Ces zones deviennent alors des facules (taches brillantes de l'ordre de 40.000 km de longueur) dans lesquelles se forment les taches sombres et les protubérances. La structure en couronne des protubérances solaires doivent ainsi leur forme à l'activité magnétique. La durée de vie d'une tache est de l'ordre de quelques jours à quelques dizaines de jours.

Ces changements s'intensifient tous les 11 ans, à mesure que le cycle solaire approche de son paroxysme. Lors de ce paroxysme, il y a inversion entre les pôles + et - des taches. Cette inversion semble être la conséquence de l'inversion du dipôle apparent du champ magnétique solaire global dont les lignes de force émergent au niveau des taches de la photosphère. Les raisons de ces inversions et de leur fréquence de 11 ans sont encore très mal comprises.

Au cours de la vie d'une tache solaire, des phénomènes complexes peuvent aboutir à des reconnections magnétiques au sein du champ de la tache.

La reconnexion magnétique est le mécanisme qui permet de brutalement convertir l'énergie stockée dans un champ magnétique en d'autres formes d'énergie. Ce mécanisme intervient dans quasiment tous les plasmas magnétisés, et donc dans la quasi-totalité de l'Univers. La reconnexion magnétique est notamment à l'origine de phénomènes parmi les plus violents de notre système solaire. Dans ce cas précis, elle peut provoquer de violentes éruptions solaires et l'expulsion radiale de plasma à très grande vitesse.

2) Vent solaire

Le vent solaire est un flux de plasma éjecté de la haute atmosphère du Soleil. Ce vent s'échappe continuellement et dans toutes les directions de la surface du Soleil, baignant ainsi l'ensemble du système solaire.

Le vent solaire est constitué essentiellement de protons, d'électrons et de noyaux d'Hélium avec des traces faibles d'ions d'éléments plus lourds, tels que l'azote, l'oxygène ou le carbone. On y trouve également l'infime présence de soufre, d'argon, de calcium, de silicium, de phosphore, de chlore, de potassium, de titane, de chrome, de manganèse, de nickel et de fer.

Le [Soleil](#) perd environ 1×10^9 kg de matière par seconde, sous forme de vent solaire. Dans la couronne surchauffée du soleil (1 million de degrés) des atomes d'hydrogène sont ionisés, ce qui leur confère une charge électrique. Par conséquent, les particules de ce plasma sont animées d'une vitesse

d'agitation thermique. Lorsque la vitesse des électrons devient supérieure à leur énergie de liaison gravitationnelle avec le Soleil et ils peuvent donc échapper à son emprise. Du fait de leurs charges électriques négatives, ils attirent les protons et les ions chargés positivement et les entraînent avec eux dans l'espace interplanétaire.

Le vent solaire atteint son maximum tous les onze ans environ, quand le Soleil connaît un surcroît d'activité. Les éruptions solaires produisent alors d'énormes orages magnétiques produisant à leur tour d'énormes éruptions solaires. Le vent solaire n'en est que renforcé.

Dans la couronne, l'attraction gravitationnelle du Soleil confinait les particules sous une forte pression, en revanche dans l'espace interplanétaire, la pression est bien moindre. Le Soleil, par suite de cette différence de pression, éjecte le plasma brûlant à une vitesse considérable. Cette vitesse reste ensuite approximativement constante jusqu'au niveau de l'orbite terrestre et au-delà, de l'ordre de 450 km s^{-1} .

Le vent solaire étant un plasma, il subit l'influence du [champ magnétique](#) solaire à proximité du Soleil, là où le champ magnétique est fort.

Le plasma héliosphérique est éjecté radialement du Soleil mais à cause de la rotation du Soleil sur lui-même (en 27 jours), un jet de plasma ancré en un point donné paraîtra s'enrouler en une spirale analogue à celle d'un jet d'eau sortant d'un tourniquet en rotation.

Une fois suffisamment éloigné du Soleil (là où le champ magnétique solaire est faible), le plasma va par son mouvement, déformer aussi les lignes de champ magnétique solaire. Cela se produit en raison de la conservation des lignes de champ, une propriété qui résulte des équations qui gouvernent un plasma idéal. Selon ces équations, dans un plasma idéal, les ions et les électrons qui partagent à un instant une ligne de champ magnétique continuent de la partager pour toujours, comme si la ligne était un fil déformable auquel les particules étaient attachées. Si l'énergie du champ magnétique domine sur celle des particules, les lignes de champ conservent leur forme et les particules du vent n'ont pas d'influence sur cette forme et sont obligées de suivre les lignes. C'est ce qui se passe dans les ceintures de radiations. En revanche, si c'est l'énergie des particules qui domine, c'est à dire si le champ magnétique est faible et la densité des particules élevée, alors le mouvement des particules n'est que légèrement affecté, mais les lignes de champ se déforment, se plient et sont drainées par les particules. C'est ce qui se passe avec le vent solaire. Les lignes de champ magnétique gelées dans le plasma sont emportées par le jet et adoptent la même structure spirale. Au voisinage de l'orbite de notre planète autour du Soleil l'inclinaison des lignes de champ par rapport à l'axe Soleil - Terre est d'environ 45° .

Les mesures optiques de polarité effectuées montrent que le champ magnétique solaire moyen possède une configuration approximativement dipolaire : celle d'un barreau aimanté. Au niveau des pôles, le champ magnétique est très fort et n'est donc pas dévié : les lignes de champ s'écartent en éventail des pôles (voir la première illustration). En l'absence de vent solaire, ces lignes de force se refermeraient d'un pôle à l'autre. Mais le vent solaire tend à emporter le champ magnétique avec lui et il y parvient sur les lignes de champ des régions équatoriales où le champ est le plus faible. La pression du plasma héliosphérique en mouvement l'emporte sur la pression magnétique et l'écoulement du vent impose sa structure aux lignes du champ.

Au voisinage du plan de l'écliptique, proche de l'équateur solaire, on trouverait donc une fine lame de plasma, appelée lame neutre le long de laquelle courent parallèlement des lignes de force de polarités magnétiques opposées. Celles qui sont issues de l'hémisphère nord solaire délimitent son bord supérieur tandis que celles qui sont dirigées vers l'hémisphère sud se situent en dessous. La traversée de cette lame neutre implique donc une inversion de polarité magnétique, c'est à dire un changement de 180° de l'orientation du champ. Si on plaçait une boussole dans le vent solaire, la direction du nord magnétique qu'elle indiquerait au-dessus du plan de l'écliptique serait grossièrement celle du Soleil (en fait incliné de 45° par rapport à celle-ci au voisinage de la Terre du fait de la structure spirale) alors que, au-dessous de ce plan, la direction du nord magnétique serait inverse.

Lors de son expansion dans le système solaire, le plasma du vent se dilue donc et atteint une densité de 6 ions par centimètre cube. Son mouvement d'ensemble ne peut s'interrompre que par

interaction avec un obstacle. On estime que la frontière entre le vent solaire et le gaz interstellaire baptisée Héliopause se situe environ à 300 UA du Soleil, soit bien au-delà de l'orbite de Pluton.

Les rafales de vent solaire particulièrement énergétiques provoquées par des [éruptions solaires](#), des [éjections de masse coronale](#) et autres phénomènes sont appelées tempêtes solaires. Pendant une éruption solaire, le nombre de particules atteignant l'atmosphère terrestre est de 10 000 (à comparer à 10 particules en l'absence d'éruption).

Le vent solaire met deux à quatre jours pour atteindre la Terre.

II. La magnétosphère

1) Introduction

La magnétosphère est la région entourant la Terre, dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés ou organisés par son [champ magnétique](#). Elle est située au-delà de l'[ionosphère](#), c'est-à-dire au-dessus de 1 000 km d'altitude. Elle est constituée d'un mélange d'ions et d'électrons libres issus de l'ionosphère et du vent solaire. En effet, dans la haute atmosphère, le rayonnement du soleil arrache des électrons aux atomes, entraînant l'apparition d'un plasma. La cohésion de ce mélange est assurée par des forces électromagnétiques très fortes par rapport à la gravité et aux collisions. Les caractéristiques propres de la magnétosphère terrestre sont déterminées par le champ magnétique terrestre, le vent solaire ainsi que le champ magnétique interplanétaire.

Malgré son nom, la magnétosphère n'est clairement pas sphérique. Sur le côté faisant face au soleil, la magnétosphère est située entre 11 et 15 rayons terrestres de distance du centre de la Terre. Sur le côté nuit, la queue de la magnétosphère peut être identifiée à un cylindre de 25 rayons terrestres de rayon, et de plus de 200 rayons terrestres de long.

Toutes les magnétosphères planétaires connues dans le système solaire possèdent cette forme caractéristique. En effet, deux facteurs déterminent la structure et le comportement de la magnétosphère :

→ Le [champ magnétique interne](#) de la Terre, associé à la circulation du métal liquide dans le noyau, entraîné par des sources de chaleur internes. S'il n'y avait pas de [vent solaire](#), le [spectre magnétique](#) de la Terre serait semblable à celui d'un [aimant](#) droit isolé. Il s'identifie au champ d'un aimant droit incliné d'environ 10° par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Le champ dipolaire présente une intensité d'environ 30000nT à 60000nT à la surface de la Terre, et son intensité diminue en $1/r^3$.

→ [Le vent solaire](#) joue un rôle important dans la structure de la magnétosphère. En réalité, la magnétosphère agit comme un écran et protège la surface terrestre du vent solaire. La forme de la magnétosphère est définie par l'interaction des particules du vent solaire avec notre champ magnétique et dépend donc de l'activité de notre étoile. Le vent solaire déforme le spectre magnétique de la Terre, qui prend la forme d'une comète dont l'extrémité émoussée est tournée vers le Soleil. A l'opposé de la Terre, la pression du vent solaire sur la magnétosphère entraîne la formation d'une queue. Une région en forme de puits conique, baptisée cornet polaire, interrompt la magnétosphère aux alentours de chaque pôle.

2) Morphologie de la magnétosphère

Choc

A environ 2RT devant la magnétopause se trouve le front d'une onde de choc stationnaire, comme celle qui se forme devant une balle ou un avion supersonique. Le vent solaire va plus vite que la vitesse des ondes qui s'y propagent (ondes acoustiques et ondes d'Alfvén, i.e. ondes de pression et de déformation des lignes de champ magnétique). Avant que le vent solaire ne se heurte à la magnétosphère, il est brutalement ralenti et une partie de son énergie cinétique se transforme en chaleur dans une région appelée le choc. Le choc est similaire dans son principe à ceux rencontrés en avant des piles de pont (ralentissement de l'eau par rapport à la vitesse des ondes de surface) ou en avant des avions supersoniques (ralentissement de l'air par rapport à la vitesse des ondes

acoustiques). La structure du choc en amont de la magnétosphère est assez complexe car les processus de diffusion de l'énergie (ralentissement du plasma et chauffage) sont liés à des processus électromagnétiques assez variés. Ensuite, le vent accélère et lorsqu'il atteint 100 à 200 RT en aval, il a non seulement regagné sa vitesse mais il a aussi infiltré la queue magnétosphérique.

Magnétogaine

Région du vent solaire au voisinage de la magnétosphère, située entre le choc (en aval du choc) et la magnétopause. C'est une région où le plasma est turbulent, on y mesure une grande agitation électromagnétique. Le plasma y est plus dense que dans le vent solaire en amont du choc. C'est là que le vent solaire s'écoule, principalement, en contournant la magnétosphère.

Magnétopause

Frontière entre la magnétosphère, dominée par le champ magnétique de la planète, et le milieu interplanétaire, dominé par le vent solaire. La magnétopause est une frontière relativement étanche en ce sens qu'elle empêche la majeure partie du vent solaire de pénétrer dans l'environnement de la planète.

Magnétosphère externe côté jour

La magnétosphère externe côté jour est une région relativement stable, occupée par les ceintures de rayonnement interne et externe. Sa densité typique d'ions énergétiques est de 1 par centimètre cube, les ions étant assortis d'électrons, généralement de basse énergie. Les ions capturés sont progressivement perdus par collisions avec le gaz neutre local ou par mise sur des orbites qui plongent dans l'atmosphère. Ces pertes sont cependant compensées par l'injection occasionnelle de plasma frais du côté nuit, lors des orages et sous-orages magnétiques. L'énergie typique d'un ion dans la ceinture de rayonnement externe est de 50 keV, et le courant électrique associé à ce plasma est le courant annulaire, entourant la terre. Le courant annulaire circule donc dans le sens horaire. Lors d'éruptions solaires intenses, il arrive que la magnétosphère externe capte beaucoup de particules chargées, ce qui provoque un orage magnétique, que l'on peut assimiler à une pluie de particules chargées au niveau des pôles.

Cornet Polaire

Les cornets polaires sont deux régions de la magnétosphère situées dans le prolongement des pôles magnétiques. À cause des déformations des lignes de champ magnétique dues à l'interaction entre le champ magnétique terrestre et le vent solaire, ils sont situés du côté jour de la magnétosphère. Il y en a un au Nord et un au Sud. La frontière de la magnétosphère, la magnétopause, n'a pas les mêmes propriétés au-dessus des cornets polaires qu'ailleurs. Les cornets polaires ne sont pas isolés du vent solaire par la magnétopause. Le vent solaire peut donc y pénétrer (avant d'être renvoyé vers la queue de la magnétosphère via le manteau). Une fois entrée, le plasma solaire n'est pas précipité vers l'ionosphère, mais chassée vers la queue de la magnétosphère, en passant par une région appelée le manteau. C'est seulement après des pérégrinations assez complexes qu'une partie de cette matière se trouvera précipitée vers l'ionosphère pour "allumer" des aurores polaires.

Zone aurorale

Régions où l'on observe communément des aurores. Les aurores résultent de la luminescence de la haute atmosphère due à la désexcitation des molécules de l'atmosphère. Les molécules sont préalablement excitées par des électrons énergétiques provenant de la magnétosphère et "précipités" vers l'atmosphère. Les zones aurorales constituent deux régions circulaires autour de pôles Nord et Sud.

Queue

Un synonyme du côté nuit, avec la nuance qu'on s'intéresse plutôt aux régions éloignées de la planète (au-delà de la plasmasphère). La queue est en aval de la planète par rapport à la direction de l'écoulement du vent solaire. La queue est une région très vaste, et très étirée. Pour la Terre, elle s'étend jusqu'à plusieurs centaines de rayons terrestres.

Manteau

Région située dans la queue de la magnétosphère, sous la magnétopause, à l'extérieur des lobes. C'est une région plus dense que les lobes. On y mesure des flux de matière importants principalement dirigés dans la direction opposée à la planète et au Soleil (*tailward motion* en anglais).

Lobe

Les lobes de la queue sont deux régions où le champ magnétique est relativement calme, au nord et au sud du feuillet plasmatisque. Les lignes de champ des lobes sont régulières, et conservent tout à fait la même direction jusqu'à leur rencontre au-dessus des pôles. Au nord de l'équateur, elles se dirigent vers la terre et au sud elles s'en éloignent.

Cette région est presque vide de plasma : sa densité est d'environ 0.01 ion par centimètre cube. Elle est cependant le siège d'un champ magnétique relativement fort pouvant stocker une énergie magnétique considérable, vu son grand volume. Pour de nombreux scientifiques, il s'agit de la réserve d'énergie des sous-orages.

Couche de plasma (ou Couche neutre ou Feuillet plasmatisque)

Le feuillet plasmatisque est une couche épaisse de plasma chaud centrée sur l'équateur de la queue, entre les lobes. En général, il est épais de 3 à 7 rayons terrestres, a une densité de 0.3-0.5 ions/centimètre cube et une énergie ionique de 2-5keV. Contrairement à la magnétosphère interne, cette région est assez dynamique, du fait du faible champ magnétique qui y règne en comparaison avec les lobes. L'épaisseur, la densité et l'énergie varient considérablement, et souvent le plasma se meut rapidement en diverses directions, en particulier vers la terre. Dans les sous orages magnétiques, quelques fragments de ce feuillet de plasma peuvent être arrachés en direction de la terre ou de la queue : les ions en direction de la terre gagnent de l'énergie et pénètrent la magnétosphère interne, alors que les sections dirigées vers l'extérieur (plasmoides) s'éloignent bien loin de la terre et sont perdues.

Le feuillet plasmatisque possède aussi un courant électrique associé, parcourant l'équateur de la queue d'un bord à l'autre, de l'aube au crépuscule. Il se referme ensuite le long de la magnétopause, et le champ magnétique créé par ce circuit aide à prolonger les lobes de la queue.

La couche de plasma ne va pas jusqu'à la Terre, et finit vers 40 000 km. Cet endroit qui rencontre l'orbite des satellites géostationnaires s'appelle la frontière interne de la couche de plasma. C'est une région très importante pour comprendre la dynamique à grande échelle de la magnétosphère.

Plasmasphère

Région de la magnétosphère qui est entraînée par la rotation de la planète sur elle-même, constituée de plasma à basse énergie. On dit que le plasma y est en co-rotation. C'est une région surtout étendue aux basses latitudes. Dans le cas de la Terre, la plasmasphère n'est pas très étendue.

3) Point neutres de la magnétosphère

La magnétopause est donc une ligne relativement hermétique qui sépare le vent solaire de la magnétosphère terrestre. Ce manque de connexion isole les deux régions l'une de l'autre et rend difficile le passage des particules et de l'énergie du vent solaire vers la magnétosphère. Cependant des points faibles existent : en traçant les lignes de champ magnétique, des points neutres se dessinent à l'intersection des lignes de champ. Une intersection de lignes de champ semble être un non sens. En effet, comment le champ magnétique en un point peut-il être dirigé dans deux directions différentes à la fois? Si nos tracés montrent néanmoins de tels points, l'intensité de la force magnétique en ces points doit être nulle, car dans ce cas la direction de la force magnétique n'existe plus.

Par exemple, en traçant les lignes de champ dans la magnétopause qui confine parfaitement toutes les lignes de champ terrestre, se dessinent deux tels points connus sous le nom de points de rebroussement de la magnétosphère (*cusp* en anglais). Ils marquent la séparation entre les lignes joignant le soleil et celles allant vers la queue magnétosphérique. Dans la région des cusp, on observe un champ magnétique désordonné, faible mais non nul. L'absence d'un champ magnétique suffisamment fort pour éloigner le vent solaire signifie que ces zones sont des points faibles de la magnétopause.

Le premier cusp est situé sur le nez de la magnétosphère. En ce point, le champ magnétique présente deux directions opposées. Les lignes de champ juste à l'intérieur du nez de la magnétopause (les lignes de champ terrestres) pointent vers le nord. Face à elles, les lignes de champ interplanétaires (les lignes gelées par le vent solaire) s'inclinent d'environ 45° vers le sud, comme si elles venaient se draper contre le nez. Les deux champs opposés peuvent donc s'annuler et créer un point neutre entre eux.

Les cusps polaire est le point neutre où les lignes du champ magnétique terrestre divergent (au nord) et convergent (au sud). Ils sont localisés dans les deux cornets polaires. Les cusps polaires sont situés à la latitude 77°, c'est-à-dire la latitude à laquelle le champ magnétique intersecte la surface de la Terre.

III. Interaction entre le vent solaire et la magnétosphère

1) Rencontre du vent solaire avec la magnétosphère

Les chercheurs soutiennent actuellement la théorie de la reconnexion expliquant les orages magnétiques.

La magnétosphère terrestre est en permanence heurtée côté jour par le [vent solaire](#). Le vent solaire transporte avec lui les lignes de champ magnétique solaire. Lorsque le vent solaire n'est pas dévié par la magnétosphère, il se forme des cordes magnétiques, ou courants électriques de Birkeland, reliant le Soleil à la Terre.

Au sein du vent solaire, le plasma est parcouru par de nombreux courants électriques. Il en résulte, en raison de l'attraction à longue portée et de la répulsion à courte distance entre les filaments de courant, une torsion des lignes de champ magnétique véhiculées par le plasma. C'est pourquoi on peut identifier les cordes magnétiques à un enchevêtrement de champs magnétiques entrelacés comme une corde de chanvre. Dans le cosmos, ces filaments de plasma entrelacés agissent comme des lignes électriques, qui véhiculent des lignes de champ magnétique alignées sur les courants (et donc parallèles entre elles) à travers l'espace interplanétaire. Ces structures apparaissent puis se démêlent en quelques minutes, mais cette existence furtive suffit à canaliser une quantité d'énergie phénoménale.

La haute atmosphère de notre planète est ainsi directement connectée au Soleil par de gigantesques cordes magnétiques. La première corde magnétique a été réellement observée par Themis en 2007 dans la magnétopause, à 70.000 kilomètres de la Terre. Sa taille était de l'ordre du diamètre de la Terre. A cette altitude, le vent solaire heurte le champ magnétique terrestre, créant un point d'équilibre mais aussi de très grandes tensions. Les cordes se forment puis se démêlent très rapidement, fournissant un bref mais important conduit pour l'énergie éolienne solaire.

*C'est donc au niveau de l'onde de choc, et plus précisément du premier cusp, que les cordes magnétiques entrent d'abord en contact avec le champ magnétique terrestre. Cette zone est donc caractérisée par de très fortes tensions. Quelquefois une brusque décharge frappe cette zone, ce qui provoque une explosion. La magnétosphère peut alors se fissurer, laissant la voie libre vers la Terre aux particules du vent solaire. Tant que le champ magnétique n'est pas réparé, les particules solaires s'engouffrent dans la brèche. **Ces particules circulent le long des cordes et pénètrent dans la magnétosphère puis dans l'atmosphère, alimentant en énergie les orages magnétiques sur le côté jour.***

Dans un plasma idéal, les ions et les électrons répartis sur une ligne de champ se mobilisent et restent constamment solidaires. Or si du plasma traverse un point neutre, là où la force magnétique est nulle, les plasmas de part et d'autre de ce point peuvent se scinder et se reconnecter aux différentes lignes de champ. C'est ce qui se passe ici.

Au niveau du cusp, et conformément à la loi de Lorentz, le vent solaire va se séparer en deux groupes : d'une part les ions positifs, qui se dirigent vers le sud magnétique ; d'autre part les électrons, qui se dirigent vers le nord magnétique. En effet la loi de Lorentz stipule que :

$$F = q*(E+v^{\wedge}B) ;$$

où q est la charge de l'objet considéré, E le champ électrique, B le champ magnétique et v la vitesse de l'objet. On conçoit alors aisément que le sens de l'attraction sera différent selon que la particule en question est chargée positivement ou négativement.

Une fois dans la magnétosphère, deux trajets sont possibles pour les particules à haute énergie du vent solaire. La formation des aurores prend donc en compte deux scénarios, qui justifient la grande variété de types d'aurore. Lorsque le vent solaire rencontre le champ magnétique, les particules qu'il contient suivent les lignes de champ magnétique qui les conduisent aux pôles. Deux chemins sont possibles, selon les hypothèses :

- le premier est direct, ce sont les cornets polaires (côté jour).
- le deuxième contourne la magnétosphère, passant par la queue (côté nuit). Les particules se retrouvent alors dans un feuillet neutre puis sont accélérées vers la Terre. Ce phénomène crée les anneaux auroraux.

Quel que soit le chemin adopté, les particules chargées gagnent toujours l'ionosphère dans la même zone au niveau des pôles appelée ovale aurorale.

2) Entrée du plasma dans la magnétosphère par les cusps polaires

Il s'agit du premier scénario. Il suppose qu'une partie des particules chargées à haute énergie du vent solaire entrée dans la magnétosphère a été ralentie et réchauffé par son interaction avec la magnétosphère. Ces particules peuvent alors être captées et canalisées par les lignes du champ magnétique terrestre du côté jour de la magnétosphère et aboutir dans les cornets polaires.

Le plasma du vent solaire entre ensuite dans les cornets polaires où il s'accumule, provoquant un sous-orage magnétique au niveau des pôles.

Cette hypothèse donne naissance à des aurores à électrons au nord magnétique, et à des aurores à protons, au sud magnétique (dans le cas des aurores à protons, les protons captent les électrons d'atomes de l'atmosphère).

3) Entrée du plasma dans la magnétosphère par mouvements de convection

Il s'agit du second scénario, et de loin le plus complexe. Il suppose qu'une partie des particules du plasma se retrouve canalisée et stockée le long des lignes de champ magnétique terrestre de la queue. Du fait de courants électriques internes qui agitent toujours le plasma solaire, ces particules vont former des cordes magnétiques parallèles qui s'étirent très loin dans l'espace à l'opposé du soleil. La pression de ces cordes (en position 5 du schéma ci-dessous) sur les lignes de la queue entraîne l'allongement de la magnétosphère côté nuit.

La théorie de la reconnexion peut nous aider à formuler des hypothèses. On suppose qu'au niveau du cusp N et des cusps polaires, les lignes de champ terrestre peuvent être liées au champ magnétique interplanétaire (CMI), produisant des lignes ouvertes (champ avec un bout connecté à la terre et l'autre connecté au CMI) parallèles entre elles, qui sont alors portées vers la queue par le vent solaire. Voici le déroulement de cette hypothèse :

→ Au niveau des cusps devant la magnétopause, les lignes interplanétaires du champ (avec le plasma les chevauchant) se joignent à ce point aux lignes terrestres. Se forment alors des lignes composées comme celle à la droite de 3 dans le schéma. Une ligne peut être divisée en deux cordes : une corde supérieure, et une corde inférieure, de part et d'autre du cusp qui marque son milieu. Cette ligne contient une incurvation fermée : la majeure partie du plasma au-delà de cette courbe est interplanétaire, alors qu'en deçà, proche de la terre, elle est avant tout terrestre. Cependant, les deux plasmas sont mobilisés ensemble, continuent à se partager la même ligne, et s'entremêlent lentement.

→ Un moment plus tard, cette ligne se déplacerait en position 4, puis en position 5. La ligne est donc progressivement étirée le long de la queue de la magnétosphère terrestre. Entre 70 à 120.000 km de la Terre, les cordes supérieure et inférieure de la ligne, qui sont d'habitude parallèles entre elles, se

rapprochent et s'intersectent en 6 au milieu du feuillet de plasma. Cela donne lieu à une reconnexion magnétique. Les éléments interplanétaires se rejoignent alors puis s'éloignent, tandis que les moitiés terrestres sont aussi réunies.

Que se passe-t-il alors ?

Au niveau du point de reconnexion 6, l'énergie excédentaire est alors éjectée sous forme de jets de particules : le plasma porté par les cordes de la ligne reconnectée s'écoulera dans le feuillet de plasma. Ceci créera une circulation régulière de plasma dans la magnétosphère et apportera également de nouveaux ions et électrons dans le feuillet de plasma au voisinage de 6. Ce processus est nommé convection. Une des questions majeures est de déterminer alors le mécanisme primaire à la base du transport de masse, d'énergie et de flux magnétique en direction de la Terre.

Plusieurs possibilités, qui relèvent encore aujourd'hui de l'hypothèse, sont alors envisageables :

→ En raison de la faiblesse du champ qui y règne, les ions et électrons entrant dans la zone de reconnexion sont constamment agités dans le feuillet de plasma, et sont entraînés par le champ magnétique du feuillet en direction de la Terre. A proximité de la Terre, ils rebondissent pour la plupart sous l'effet de la convergence des lignes magnétiques, mais quelques uns atteignent l'atmosphère et s'y perdent et atteignent les pôles: un sous-orage se déclenche.

→ Il se peut aussi que les reconnexions dans la queue libèrent le plasma solaire dans le feuillet de plasma et le catapultent vers l'atmosphère terrestre, comme le ferait un élastique qui après étirement reviendrait à sa position initiale (c'est le cas des lignes magnétiques). Les particules solaires vont être alors précipitées à très grande vitesse vers la Terre et vont s'engouffrer dans les cornets polaires. Cela va provoquer un sous orage magnétique.

→ Un autre candidat possible est le phénomène de Bursty Bulk Flow (BBF), des flux de gaz ultra-rapides qui voyagent à plus de 300 km/s au sein de la couche centrale de plasma. Ceux-ci pourraient entraîner le plasma solaire de la zone de reconnexion dans leur mouvement vers la Terre. Mais leur confinement spatial, ainsi que leur courte durée, semaient jusqu'à présent le doute sur leur implication dans les phénomènes de sous-orages polaires. D'après une étude statistique récente, les BBF seraient néanmoins très efficaces pour asperger la Terre de plasma.

Il faut garder en mémoire, en lisant ce document, que tous les événements qui y sont expliqués relèvent pour la plupart de l'hypothèse. Le satellite Themis a en effet observé une zone de reconnexion à environ 70.000 kilomètres de la Terre. Mais ce n'était qu'une hypothèse. La reconnexion évoquée plus haut pourrait tout aussi bien être la conséquence d'un autre phénomène, provoqué par un autre effet, inobservé celui-là. D'autres part, de nombreuses hypothèses de départ ont été admises, qui ne sont pas forcément exactes : le processus de reconnexion magnétique au niveau du point N nécessite par exemple que les lignes de champ interplanétaire soient inclinées vers le sud. Or c'est une condition qui n'existe que la moitié du temps.

Quelle que soit l'hypothèse adoptée, les particules issues du vent solaire sont catapultées vers la Terre, s'engouffrent dans les cornets polaires et entrent dans l'atmosphère dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique. L'énergie ainsi libérée approche cinq cent mille milliards de joules, une valeur phénoménale qui correspond à l'énergie dégagée durant un séisme de 5,5 degrés sur l'échelle de Richter. Elle arriverait à traverser une région polaire entière en quelques minutes.

III. Interaction entre les particules chargées et l'atmosphère

Le premier phénomène d'aurore polaire est l'aurore diffuse, causée par l'entrée de particules chargées venant du Soleil dans l'atmosphère terrestre. Ces électrons et ions continuent leur course jusqu'à l'ionosphère, où ils sont arrêtés par les molécules et atomes constitutifs de l'atmosphère. L'ionosphère se situe entre 60 et 1000 km d'altitude, c'est la partie de l'atmosphère ionisée par les

rayonnements ultraviolets émis par le Soleil. Chaque photon du rayonnement ultraviolet véhicule beaucoup d'énergie, et lorsqu'il est absorbé par un atome ou une molécule, il lui arrache un électron.

Les gaz de l'ionosphère sont sous forme de plasma : c'est un mélange électriquement neutre d'électrons et d'ions positifs. Les ions positifs sont pour la plupart monoatomiques du fait de l'excitation par le rayonnement ultraviolet. La pression de l'ionosphère varie entre 0,01 Pa = 10^{-7} bar entre 90 km et 120 km d'altitude et 10^{-4} Pa = 10^{-9} bar entre 120 km et 800 km d'altitude. L'atmosphère côté nuit de la planète n'est pas exposée aux rayonnements du Soleil. Ainsi l'ionosphère côté nuit perd de l'énergie et une partie cesse d'être sous forme de plasma ; cette partie n'est alors plus de l'ionosphère mais de la mésosphère (entre 55 km et 100 km d'altitude), de la thermosphère (entre 100 km et 600 km d'altitude) ou de l'exosphère (à partir de 600 km d'altitude). C'est pourquoi l'altitude de l'ionosphère peut varier fortement au cours du temps et dépend du lieu où l'on se place. Du fait du rayonnement du Soleil, la température de l'ionosphère est de l'ordre du millier de Kelvin (K). Notons une dernière chose à propos de l'atmosphère. D'après la loi des gaz parfaits, $PV = nRT$. P est la pression en Pascal (Pa), V le volume en m^3 , n la quantité de matière en mol, R la constante des gaz parfaits ($R = 8,314472 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et T la température en Kelvin (K). Les gaz de l'ionosphère, étant à basse pression, peuvent être considérés comme des gaz parfaits. On tire de la loi des gaz parfaits que la densité des particules dans l'atmosphère est $d = n/V = P/RT$. Or plus on s'élève dans l'atmosphère, plus la pression diminue, puisque l'attraction gravitationnelle de la Terre diminue. La température étant à peu près constante comparée à la pression, il s'ensuit que la densité des particules diminue lorsque l'altitude augmente. Cette remarque nous sera utile par la suite.

Lorsqu'un électron ou ion entre en contact avec un atome ou une molécule des gaz de l'ionosphère, il lui transmet son énergie par collision. L'énergie de l'électron ou ion en Joule (J) est donnée par $E = \frac{1}{2}mv^2$ (m la masse en kg et v la vitesse en $m s^{-1}$) ou, pour l'électron, $E = eU$, e la charge élémentaire ($e = 1,602176487 \times 10^{-19} \text{ C}$, C pour Coulomb) et U la tension du courant en Volt (V). Alors, un des électrons de la couche de valence de la molécule dite excitée passe dans une couche électronique supérieure. La molécule ou l'atome excité peut alors transmettre son énergie à une autre particule par collision : c'est la désactivation collisionnelle.

Cependant, comme la densité des particules est faible dans l'ionosphère du fait de la basse pression et de la haute température, la désactivation collisionnelle a peu de chances d'arriver. La molécule perd donc cette énergie lorsque l'électron retourne dans sa couche d'origine, et émet un photon ; c'est l'émission spontanée. La fréquence ν en s^{-1} du photon émis est $h\nu = E$ où E est l'énergie en Joule du photon émis, égale à l'énergie perdue par l'électron en changeant de couche et h la constante de Planck ($h = 6.62606896 \times 10^{-34} \text{ J s}$). $\lambda\nu = c$, λ la longueur d'onde en m, c la vitesse de la lumière dans le vide en $m s^{-1}$, soit $\nu = c/\lambda$ D'où $hc/\lambda = E$ soit $\lambda = hc/E$.

Le flux de particules chargées dans l'ionosphère produit ainsi un spectre d'émission. Le spectre d'émission est spécifique pour chaque gaz et est constitué de raies de couleur. Par exemple, le spectre d'émission du sodium est une lumière jaune constituée de deux rayonnements, l'un de longueur d'onde 589,00 nm et l'autre 589,59 nm. Cette spécificité dépend de la structure électronique des atomes.

L'ionosphère est essentiellement constituée d'azote moléculaire (N_2), d'azote atomique (N), d'oxygène moléculaire (O_2) et d'oxygène atomique (O). On ne considérera ici que les émissions dans le domaine visible. L'oxygène moléculaire émet dans l'ultra-violet. L'azote moléculaire émet une raie à 391,4 nm (violet) et une raie à 427,8 nm (bleu). Trois cas différents se présentent pour l'atome d'oxygène excité. L'atome d'oxygène peut être à trois niveaux d'énergie différents : du plus faible au plus fort, 3P, 1D, 1S. Lorsqu'il est excité, il atteint le niveau 3P. 1er cas : l'atome d'oxygène entre en collision avec une autre particule dans un temps inférieur à 0,9 s après l'excitation. L'atome passe alors directement du niveau 1S au niveau 3P par désactivation collisionnelle et n'émet pas de photon. 2e cas : l'atome d'oxygène ne rencontre pas d'autre particule dans les 0,9 s qui suivent son excitation. Il passe alors du niveau 1S au niveau 1D en émettant de la lumière verte. Ensuite, l'atome d'oxygène passe au niveau 3P par désactivation collisionnelle. 3e cas : l'atome d'oxygène conserve son énergie pendant 0,9 s après l'excitation et émet de la lumière verte, passant du niveau 1S à 1D. Puis, il reste excité pendant encore 110 s, et passe du niveau 1D au niveau 3P en émettant de la lumière rouge (630,0 nm et 636,4 nm). On a vu que la densité des particules diminue avec l'altitude, donc les chances d'entrer en collision avec une autre particule diminuent avec l'altitude. C'est pourquoi le 3e

cas se présente dans les plus hautes altitudes (250 km), là où la densité des particules est plus faible. De même, la raie verte de l'oxygène n'est observable qu'à partir de 100 km d'altitude.

En dessous de 100 km, la densité des particules est trop élevée pour que l'on puisse observer les raies d'émission de l'oxygène atomique. C'est pourquoi les aurores polaires apparaissent en général, de bas en haut, violettes (N λ), vertes (O), puis rouges (O). On ne peut pas reproduire le spectre d'émission de l'oxygène par l'expérience car il faudrait une pression extrêmement basse ($P = 10^{-9}$ bar). C'est pourquoi les raies d'émission de l'oxygène atomique sont appelées « raies interdites ». On trouve également dans les aurores les raies d'émission de l'hydrogène, à 656,2 nm (rouge), 486,1 nm (bleu), 434,0 nm (violet) et 121,6 nm (ultraviolets). Ces raies sont d'intensité faible par rapport aux autres gaz. Les raies d'émission de NO et NO λ molécules aussi présentes dans l'ionosphère, forment un fond continu peu intense dans le visible vers 100 km d'altitude.

Comme les particules chargées sont arrêtées par l'atmosphère, elles n'arrivent pas au-delà d'une certaine latitude, ce pourquoi les aurores polaires ne sont visibles qu'aux pôles. Cependant, lors de vents solaires particulièrement violents, les aurores polaires peuvent être très intenses et s'étendre jusqu'à des zones proches de l'Équateur. Par exemple, une aurore polaire a été vue et décrite à Paris par Camille Flammarion le 24 octobre 1870. Le 2 septembre 1859 eut lieu l'une des aurores polaires les plus spectaculaires : elle a été vue et décrite en Amérique, en Australie, en Europe et au Japon.

Le second type d'aurore polaire est l'aurore brillante. Kristian Birkeland, physicien norvégien qui jeta les bases de l'explication du phénomène des aurores, observe que lorsqu'une aurore brillante apparaît au ciel, elle est accompagnée d'une forte perturbation magnétique. Il en déduit qu'il doit exister un courant électrique causant cette perturbation, venant de l'espace et repartant en direction de l'espace. En 1973, le satellite Triad, un satellite expérimental de navigation qui orbitait à basse altitude autour de la terre, confirme l'existence de ces courants, baptisés alors courants de Birkeland. Le plasma éjecté par le Soleil permet à un courant électrique de passer le long des lignes de champ magnétique terrestre. Ce courant cause alors une forte perturbation du champ magnétique qui reste très locale.

IV. Expérience : Modélisation et reproduction d'une aurore polaire

I. Préparation de l'expérience :

1) Introduction

Bien que les aurores polaires soient le résultat d'un processus physique assez complexe, il est possible de nos jours de recréer ce phénomène en laboratoire. Même si les conditions physiques réelles dans lesquelles les aurores polaires se produisent ne sont pas tout à fait respectées, on peut cependant reproduire une expérience analogue avec du matériel plus accessible et dont les résultats observables seront les mêmes. Ainsi, nous allons tenter de reproduire le phénomène des aurores polaires, à l'aide du matériel de laboratoire. Cependant, nous effectuerons quelques modifications quant à la composition de l'ionosphère artificielle et le flux de particules, symbolisant le vent solaire. Par conséquent, les gaz contenus dans l'ionosphère seront remplacés par ceux de l'atmosphère terrestre (à savoir diazote en grande partie) ainsi que par de l'hélium. Le vent solaire, flux de particule chargé, sera représenté par un système à projection d'électron, formé d'une cathode et d'une anode. On s'autorise de tels changements, car les conditions de laboratoire étant restreintes, il est difficile d'une part d'obtenir des résultats satisfaisants avec les gaz tels que le dioxygène, composant majeur de l'ionosphère terrestre. D'autre part, le vent solaire artificiel, constitué d'un flux d'électrons, ne diffère qu'en partie du vent solaire réel, puisque ce dernier est aussi composé d'électrons. Les conditions de pression de l'expérience avoisineront celles du phénomène réel, dans lesquelles les aurores polaires se produisent (c'est-à-dire que la pression des gaz dans l'expérience sera quasiment la même que celle dans l'ionosphère terrestre). La pression nous importe d'autant plus que les rayons lumineux produits par les gaz lors d'une aurore polaire sont plus visible à très basse pression.

2) Matériel et schéma du dispositif

Ainsi, nous disposerons du matériel suivant :

- * Un système d'émission d'électron qui comprend une cathode et une anode
- * Bombonne d'hélium et de diazote
- * Une cloche à vide munie d'une pompe à vide
- * Une terrella : boule d'aluminium creuse contenant un aimant, symbolisant la terre munie de son champ magnétique.
- * Un générateur haut-tension

La cloche à vide joue deux rôles dans cette expérience : cela nous permet d'une part de reproduire une atmosphère différente de l'atmosphère terrestre, qui contient en majeure partie du diazote, et d'autre part d'isoler le système de l'extérieur pour limiter les effets perturbateurs (par exemple, les électrons circuleront que dans la cloche, et ainsi, il n'y aura aucune perte de particule). De même, on peut nous-mêmes décider de la pression des gaz contenus dans la cloche, très faible par rapport à la pression ambiante de l'atmosphère terrestre (qui tourne autour de 1013 hectopascal).

Le matériel mis à disposition sera monté de la façon suivante :

Dans un premier temps, nous disposons à l'intérieur même de la cloche à vide la terrella, suspendu par un fil, ainsi que de part et d'autre de la terrella dans le sens de la largeur, une cathode et une anode. Ce dispositif permet de faire circuler un flux d'électron à l'intérieur de la cloche, représentatif du vent solaire. Par la suite, nous faisons le vide dans la cloche et nous introduisons les gaz voulus, à savoir l'hélium et l'azote, à travers l'orifice qui se trouve au niveau du plateau sur lequel repose la cloche (voir schéma). Dans l'expérience suivante, nous nous passerons du dioxygène, car les conditions expérimentales ne nous permettent pas d'obtenir des résultats satisfaisants avec ce gaz. La pression à l'intérieur de la cloche sera voisine de celle de l'ionosphère, c'est-à-dire environ égale à 2 pascals. Le système cathode-anode est relié à un générateur haute tension (de plusieurs kilovolt), du fait de la forte résistivité de l'air (si la tension n'est pas suffisamment élevée, les électrons ne peuvent circuler dans l'air). Voir le schéma du montage.

Ainsi, le but de l'expérience est de montrer que les gaz contenus dans la cloche à vide réagissent au contact du flux de particules et émettent des rayons lumineux.

II. Résultat de l'expérience:

1) Observation :

La photo, ainsi que les observations de l'expérience sont joints en annexe avec le dossier.

2) Interprétation :

Les résultats de cette expérience ont permis de mettre en évidence deux phénomènes attendus. Tout d'abord, le flux d'électron émis par le système anode-cathode et qui traverse l'atmosphère de la cloche excite les gaz contenus dans celle-ci. Ces gaz, au contact de particules chargées, s'ionisent et produisent une source lumineuse, réaction quasi-instantanée qui leur permet de revenir dans leur état stable d'origine. D'ailleurs, la couleur bleutée de ce rayon correspond bien au spectre d'émission du diazote, gaz majoritairement présent dans la cloche à vide.

Ensuite, la forme du rayon lumineux permet de mettre en évidence l'activité du champ magnétique de la terrella. On remarque que le rayon lumineux converge au niveau de l'un des deux pôles de la terrella, à savoir le pôle nord magnétique, et c'est à cet endroit précis que l'intensité lumineuse est la plus élevée. Ce résultat était tout à fait prévisible : le flux d'électrons, particules chargées négativement, est capturé par les lignes de champ magnétique formées par la terrella. Or ces lignes de champs sont courbées et partent du pôle sud de la terrella, pour converger vers le pôle nord (schéma en annexe). C'est pourquoi le flux d'électrons suit le même chemin et s'accumule au niveau de l'extrémité du globe, ce

qui permet une plus forte ionisation des gaz à cet endroit précis. D'où une source lumineuse plus intense.

III. Conclusion :

Le phénomène des aurores polaires, qui a su impressionné plusieurs civilisations depuis des générations, n'a plus de mystère pour nous. Désormais il est possible de reproduire une aurore polaire en laboratoire, à l'aide d'outils adéquats. Ainsi, l'expérience ci-dessus nous permet de valider les hypothèses concernant le phénomène des aurores polaires, selon lesquelles les gaz de l'ionosphère émettent une source lumineuse au contact du flux de particule en provenance du soleil, conformément à la théorie énoncé dans la première partie.