

POLARIS

Aurores polaires :
Un phénomène haut en couleurs
dans tout le système solaire

Jouffré Marie
Minoue Maëva

*Dans le nord de mes pensées
C'est là que je t'ai trouvée
Comme un voile qui se lève
Sur une nuit qui s'achève »
Marc Aymon – Aurore Boréale*

Le phénomène a souvent gardé un côté mystérieux et était source de mythes. En effet, les aurores polaires ont toujours constituées l'un des spectacles les plus impressionnants de la nature, en réalité étroitement liées aux éruptions solaires. Aujourd'hui, le secret de la formation des aurores polaires a été percé sur Terre. Mais quand est-il des autres planètes du système solaires ?

PEUT-ON ADMIRER DES AURORES POLAIRES SUR D'AUTRES PLANETES ?

SOMMAIRE

Qu'est-ce qu'une planètes...page 12	Origine...page 6	Et sur les autres
aurore polaire ?...page 4	Les vents solaires	Lieux de visibilité
	Champ magnétique	Conditions favorables
	Excitation des atomes	Expérience



SOMMAIRE

L'aurore

Du mythe à la réalité...

page 24

Conclusion

Médiagraphie...page 27

Légendes

...page 26

Remerciements...page 29

Quelques dates clés

Les v

Champ

QU'EST-CE QU'UNE AURORE POLAIRE ?

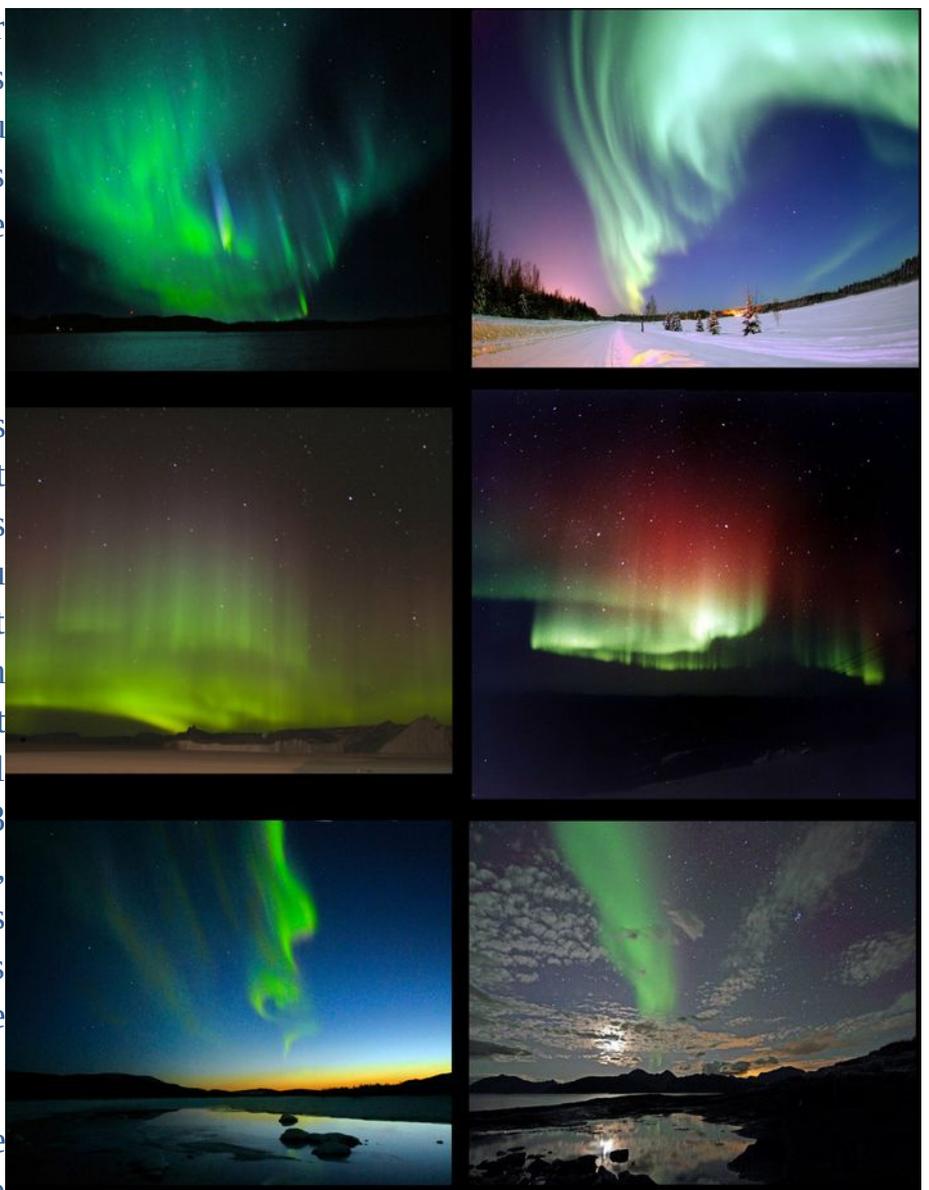
Les aurores polaires sont de magnifiques phénomènes qu'il est possible d'observer dans les régions les plus proches des pôles et visible de nuit. On parle d'aurores boréales lorsqu'elles apparaissent proches du pôle Nord et d'aurores australes lorsqu'on les observe proches du pôle sud.

Pour les scientifiques et officiellement, une aurore polaire est définie comme un phénomène lumineux caractérisé par des voiles colorés dans le ciel nocturne, provoqués par l'interaction entre les particules chargées du vent solaire et les particules de la haute atmosphère.

Les phénomènes auroraux prennent plusieurs teintes différentes, passant du vert au rose, au rouge et au violet, qui varient en fonction de gaz présent dans l'atmosphère. Il présente généralement 3 couleurs de base (vert, jaune et rouge), mais près de 25 couleurs différentes peuvent être observées.

Par exemple, la lumière verte provient de

l'excitation des atomes d'oxygène qui est l'une des couleurs les plus



fréquemment observées, tandis que l'excitation des molécules d'azote émet une lumière dans le bleu ou le rose.

On peut déterminer 8 formes d'aurores polaires :

-l'arc : il s'étend d'un bout à l'autre à l'horizon comme une simple courbe. La longueur d'un arc peut atteindre 1.000 kilomètres alors que son épaisseur est inférieure à 5 kilomètres. C'est un modèle typique des périodes de basse activité solaire.

-la bande : c'est un arc qui s'étend à l'horizon dans le ciel. Elle présente des formes de plis, avec des éclats de lumière à sa base et des luminosités floues à son sommet. C'est un modèle fréquent dans les périodes d'activités solaires moyennes à élevées.

-le rideau : ce sont des rayons ondulés et spiralés occupant une

grande partie du ciel. L'intensité des rayons lumineux changent souvent. C'est une forme impressionnante observable lors de fortes activités solaires.

-la tâche : luminosité et étendue faible, semblable à de petits nuages. Cette forme apparaît lors de faibles activités solaires.

-la couronne : ce sont des explosions de rayons lumineux qui s'ouvrent au zénith et se dirigent dans toutes les directions. Elle a des mouvements et des variations très rapides. Cette forme est typique lors des périodes d'activité solaire élevées.

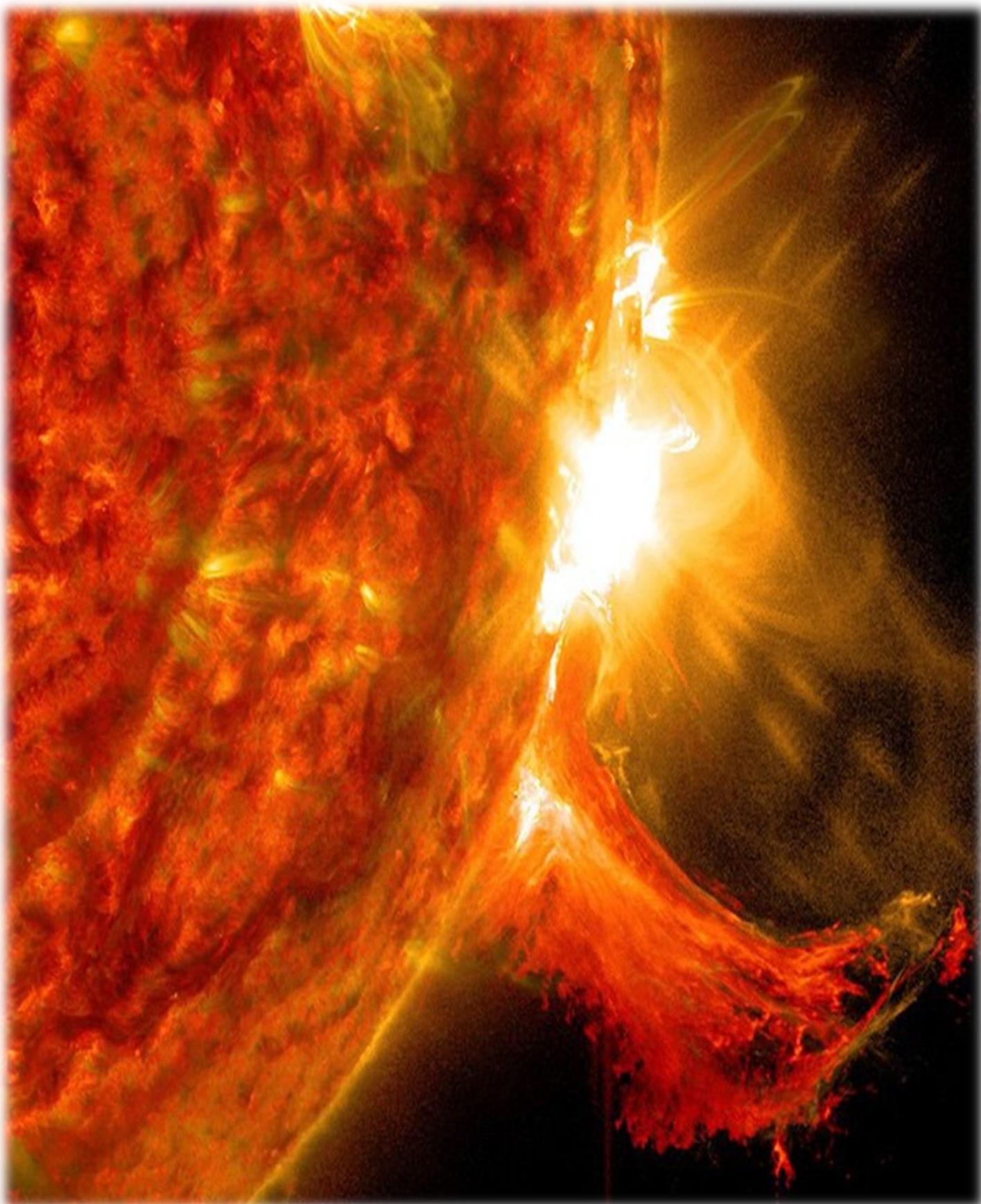
-les piliers : rayons lumineux suspendus verticalement et alignés dans le ciel. Ils peuvent faire plusieurs centaines de kilomètres de hauteur. Ils sont aperçus lors de fortes activités solaires.

-le voile : il couvre une vaste région du ciel, avec des luminosités uniformes de différentes couleurs brillantes et chatoyantes, fréquent lors d'activité solaire élevée.



Ce phénomène a toujours capté l'attention et impressionné. L'aurore polaire est l'un des plus beaux et plus grands spectacles de la nature, L'Homme ne peut que l'admirer et non le contrôler.

Eruption solaire filmée par SDO



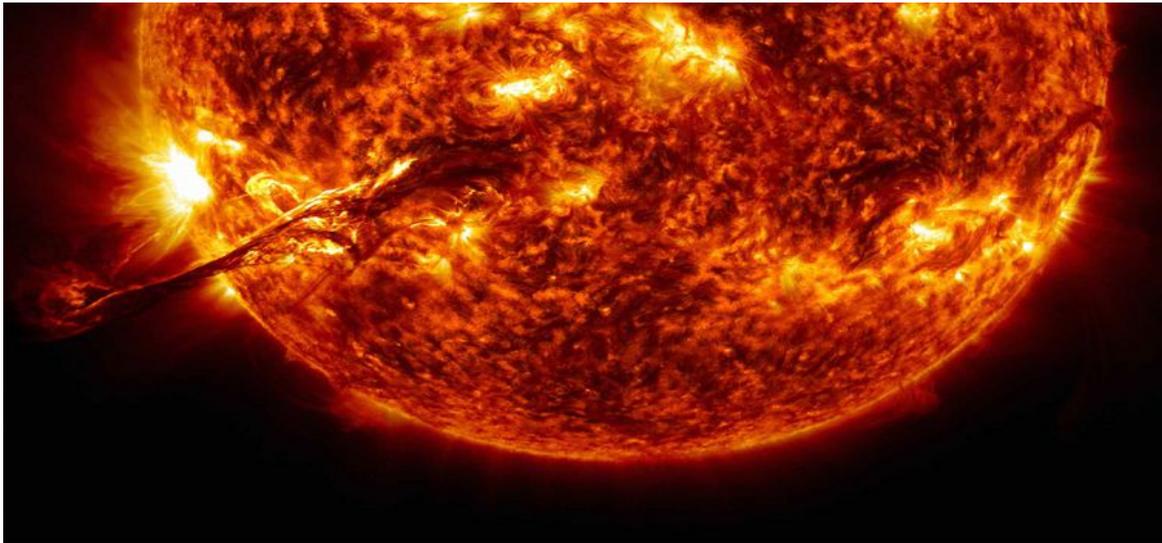
ORIGINE DES AURORES POLAIRES

En terme technique, une aurore polaire est une **fluorescence** provoquée par l'interaction entre les atomes/molécules de la haute atmosphère terrestre et les particules de haute énergie venant de l'espace, pénètrent dans l'atmosphère. Parmi ces particules, des électrons et des protons sont transportés par les vents solaires puis sont guidées par les lignes de force du champ magnétique terrestre. Observons plus en détails ce phénomène...

Les vents solaires

Tout commence avec l'étoile la plus proche de la Terre : le Soleil. Sa surface est tellement brûlante qu'il s'y forme des vents solaires qui circulent sans interruption, composés essentiellement de gaz, électrons, protons et ions. Ces vents solaires sont assez puissants pour transporter avec eux des particules à travers le système solaire et bien au-delà. Ils transportent de grandes quantités de particules (1 à 3 protons par cm cube) jusqu'à la Terre en un voyage de 2 à 4 jours à des vitesses supersoniques de 250km/s à 300km/s.

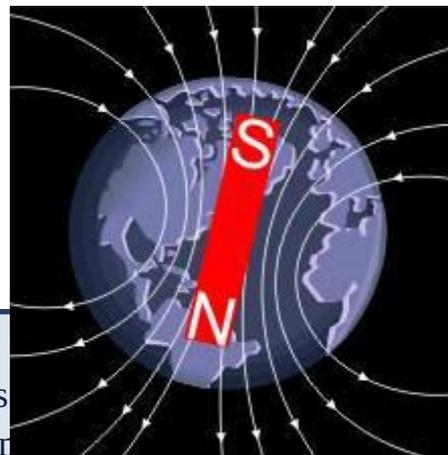
ZOOM  : Le soleil est principalement constitué d'hydrogène, gaz converti en hélium dans le cœur : cette réaction produit de colossal quantité de rayonnement. Dans environ cinq milliards d'années, le Soleil gonflera pour devenir une géante rouge, "avalant" du même coup les planètes Mercure, Vénus, la Terre et Mars.



Champ magnétique terrestre

La magnétosphère ou champ magnétique terrestre agit comme un bouclier protecteur, s'apparentant à une grosse bulle protégeant notre atmosphère terrestre de toutes particules qui arriveraient sur Terre. En effet, sans elle, la vie sur terre n'existerait pas car les particules transportées par les vents solaires qu'elle stoppe nous sont mortelles.

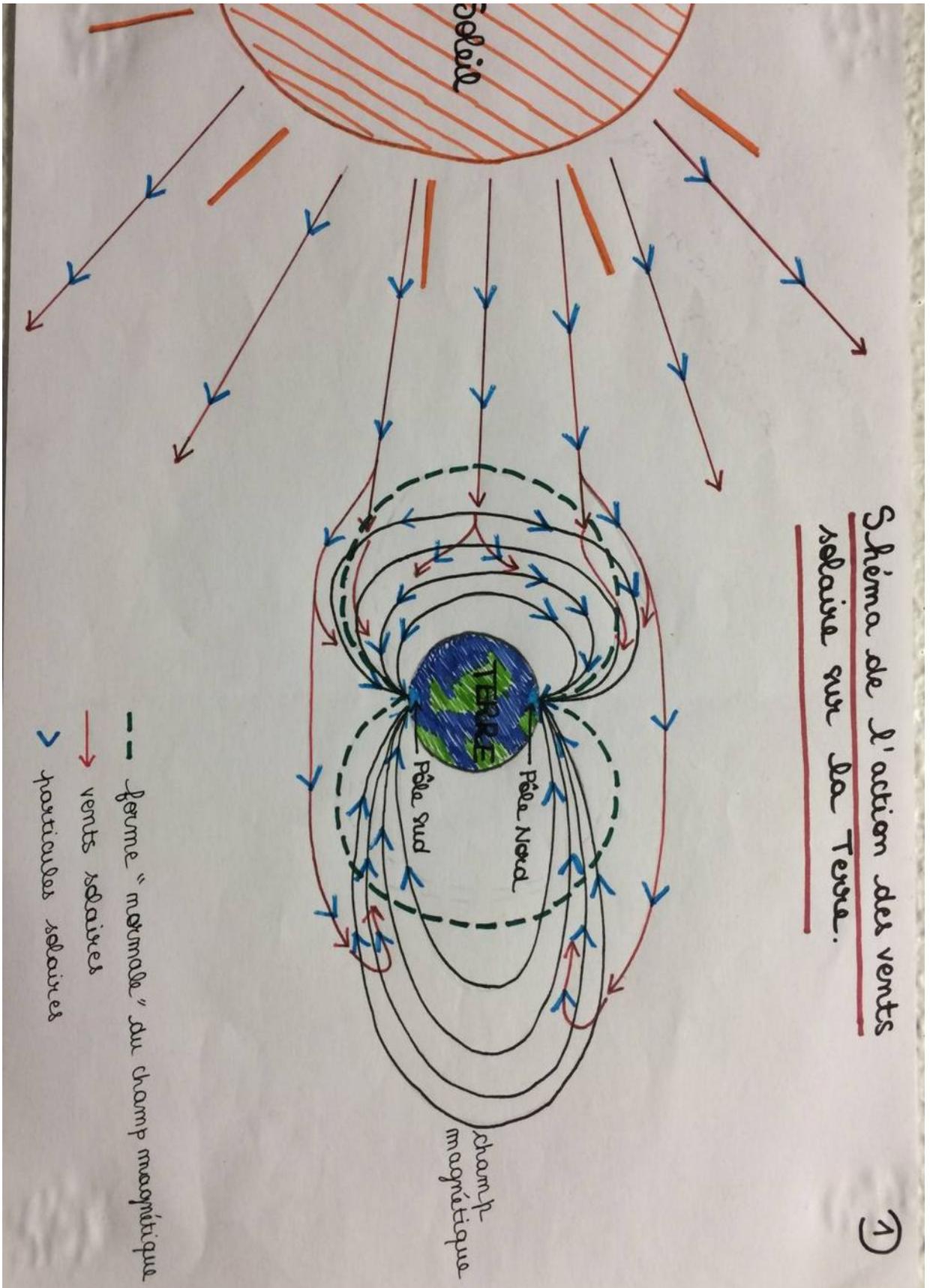
Le champ magnétique terrestre peut être comparé à celui d'un aimant droit, le point central de cet aimant étant le centre de la Terre, le pôle Nord étant la pôle Sud magnétique et le pôle Sud étant le pôle Nord magnétique (par convention).



LE SAVIEZ-VOUS ? : Le noyau de la Terre est un mélange de fer, de nickel et d'éléments plus légers. La Terre est plus chaude que la surface du Soleil. Le noyau transporte une charge électrique qui en tourbillonnant génère un champ électromagnétique. Le champ magnétique est donc produit par les mouvements à l'intérieur du noyau externe liquide.

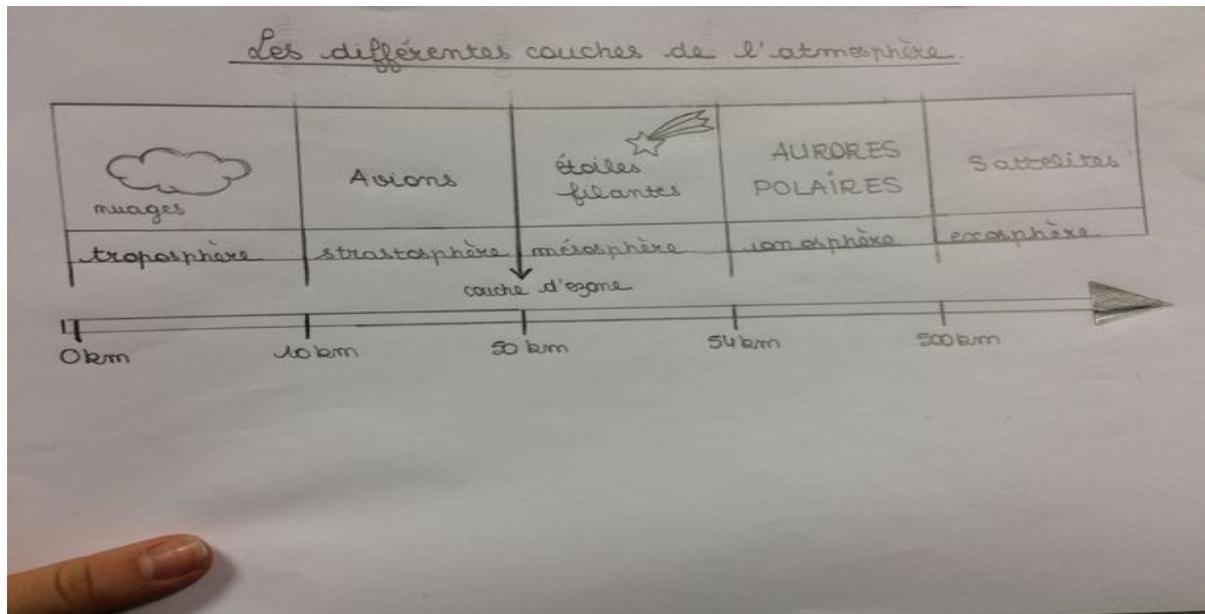
La magnétosphère est formée de deux boucliers, formant des demis cercles de chaque côté de la Terre, se rejoignant aux pôles géographiques. Cependant, la forme et la taille de ce champ magnétique n'est pas constante au cours du temps : les vents solaires déforment le champ magnétique terrestre, celui côté Soleil est écrasé vers la Terre; celui du côté opposé de la Terre est allongé par les vents solaires.

Les vents solaires frappent la Terre parallèlement. Ceux qui touchent le champ magnétique en premier voient leurs particules suivre les lignes du champ magnétiques en mouvement continuels vers les pôles. D'autres vents, qui contournent le champ magnétique « écrasé », reviendront lentement par l'arrière pour suivre les lignes du champ magnétique « allongé ». En aucun cas les particules solaires traversent les lignes du champ magnétique pour se diriger comme bon leur semblent vers la Terre : la force qu'exerce la magnétosphère les obligent à suivre ses lignes pour se diriger uniquement vers les pôles.



Excitation des atomes

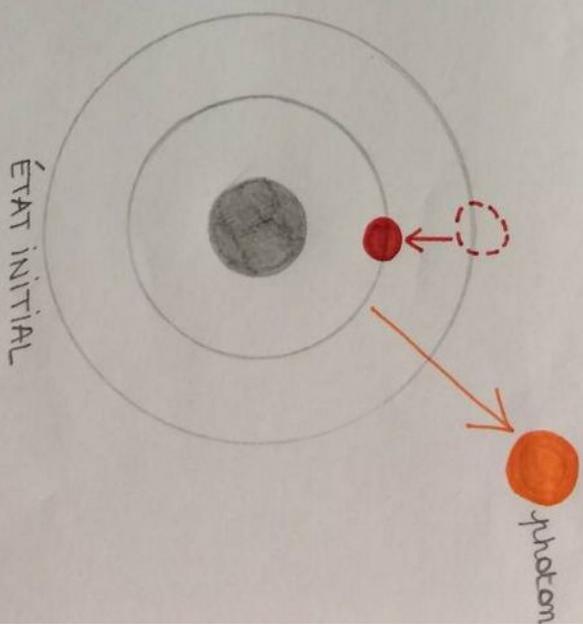
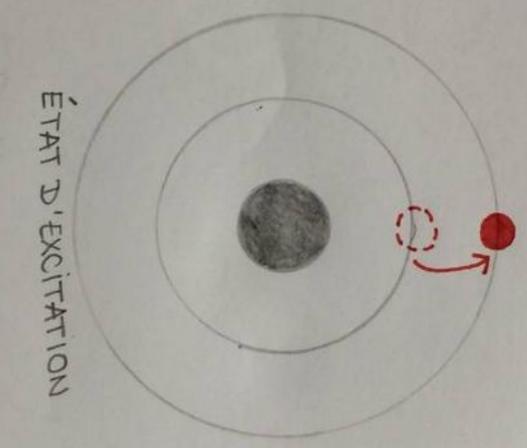
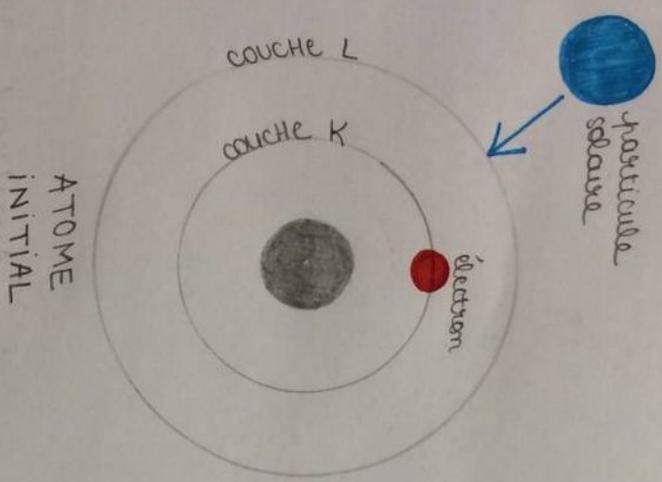
L'atmosphère terrestre est composée de différentes couches allant de la troposphère à la thermosphère (0 à 800 km d'altitude). Les aurores boréales se forment au niveau de la thermosphère (entre 90 et 500 km d'altitude).



Lorsque les molécules de l'atmosphère sont heurtées par les particules solaires chargées, les atomes sont portés à un état d'énergie supérieur : les électrons passent d'un état fondamental (état stable) à un état excité. Ils regagnent rapidement leur état initial en restituant l'énergie acquise sous la forme de photons lumineux de rayonnement de longueur d'onde correspondant à l'atome qui l'émet, par exemple les atomes d'oxygène excités émettent des photons de rayonnement vert, ceux d'azote du rose,...

Ainsi, les aurores polaires sont associées aux vents solaires, aux particules qu'ils transportent et, qui par la force du champ magnétique terrestre, rentrent dans l'atmosphère au niveau des pôles où elles rentrent en collision avec les molécules de l'atmosphère. Ces molécules excitées émettent un photon (particule de lumière) lorsqu'elles retrouvent leur état initial, ce qui produit de la lumière et forme les aurores polaires.

le processus de production de la lumière dans l'atmosphère



Une particule solitaire (en bleu) entre en collision avec un atome de l'atmosphère

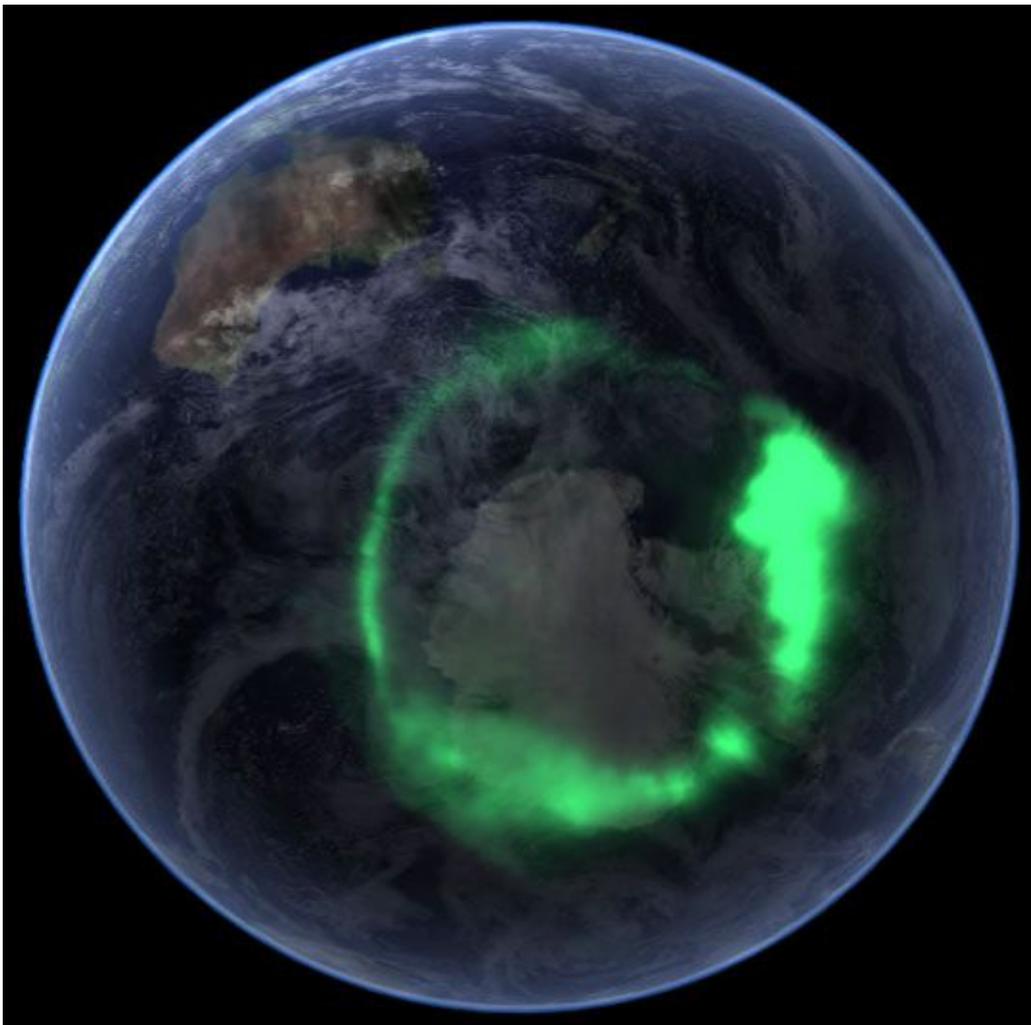
Suite à cette collision l'atome est excité et ses électrons migrent sur ses couches électroniques supérieures.

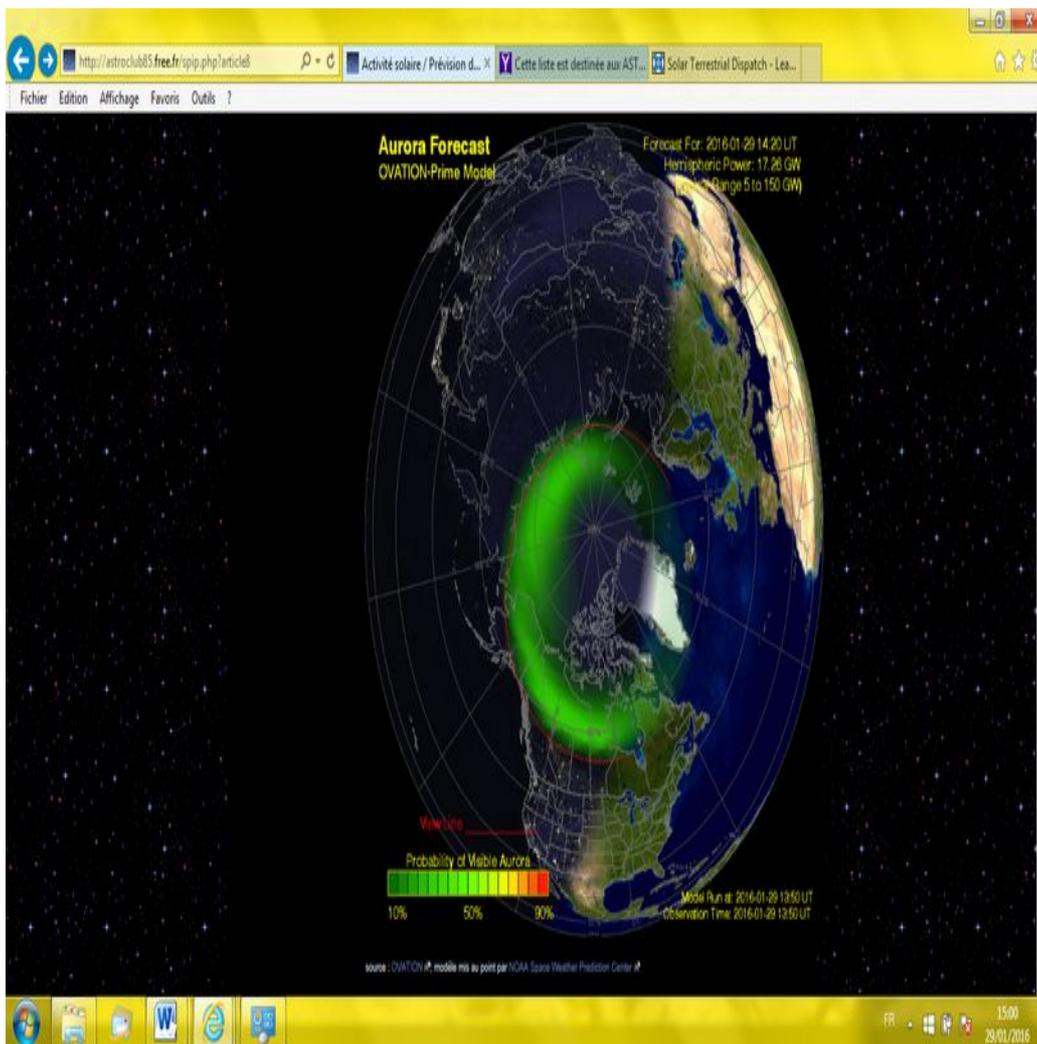
En se désexcitant, l'atome, dont les électrons redescendent sur leurs couches initiales, émet un photon, donc de la lumière

ET SUR LES AUTRES PLANETES ?

Lieux de visibilité

Les aurores polaires se forment dans un secteur bien défini : l'ovale auroral qui encadre les pôles magnétiques (au-dessus des régions de hautes altitudes : Alaska, nord de la Scandinavie,...). Cet ovale n'est pas fixe, il bouge parfois, s'élargit, rétrécit...la dimension de cette forme dépend de l'activité solaire : plus les vents solaires sont importants et frappent le champ magnétique avec force et rafale, plus l'ovale devient large et s'étend et on peut alors avoir la chance d'admirer des aurores polaires dans des endroits inhabituels, par exemple au Nord Pas-de-Calais en 2004.





Le 29 janvier, nous nous sommes rendues sur le site de la NOAA Space Weather Prediction Center qui montre une estimation de la position de l'ovale auroral (hémisphère Nord) terrestre le jour même, calculée à partir des données de la sonde ACE.

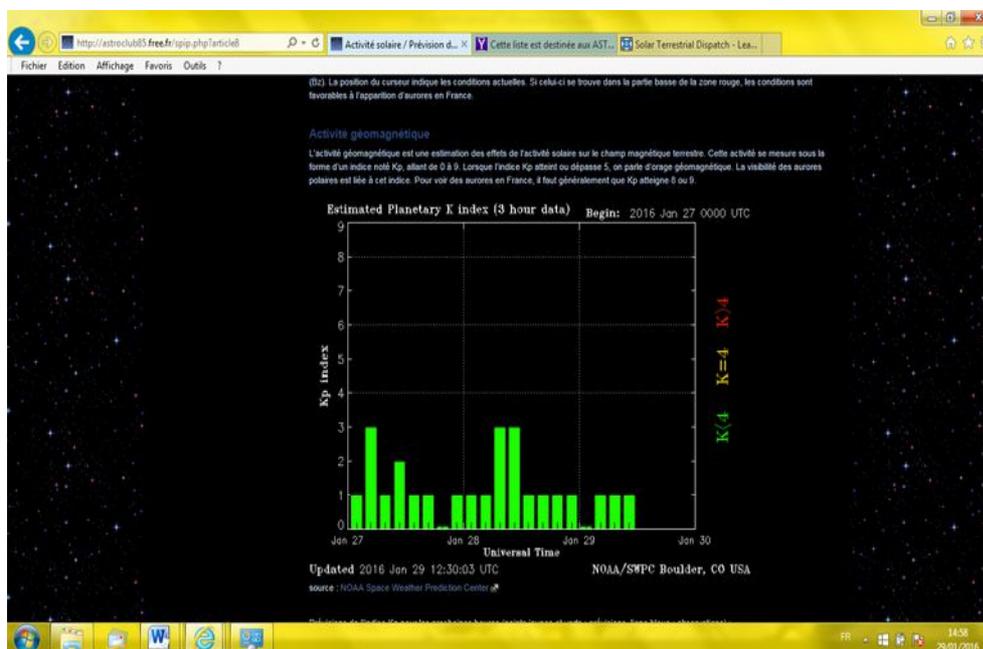
La zone verte indique la zone où se trouvent les aurores, la ligne rouge indique la limite sud de visibilité de l'aurore. L'aurore est donc théoriquement visible au nord de la ligne rouge. Pour que l'aurore soit visible en France, il faut que la ligne rouge descende sur la France et que l'aurore soit très intense (en rouge).

Conditions favorables

L'observation des aurores dépend de la météo et de la saison. Les aurores boréales apparaissent aussitôt la tombée de la nuit, généralement très actives avant minuit. Bien sûr, il faut choisir de faire la chasse à l'aurore les soirs de ciel dégagé, sans lune et l'hiver car les nuits sont plus longues et plus noires. Des statistiques d'observation confirment que les mois de septembre, octobre, février et mars sont les périodes par excellence. Aussi, il ne faut pas oublier qu'il faut s'éloigner le plus possible des villes car la pollution lumineuse nuit à l'observation du spectacle.

Les aurores polaires sont présentes tout le temps mais on note une fréquence très importante d'aurores polaires tous les onze ans car on observe une activité solaire très importante, des éruptions solaires en chaîne et en grande quantité, la dernière en date est celle de 2004 . Il s'agit des nuits les plus favorables.

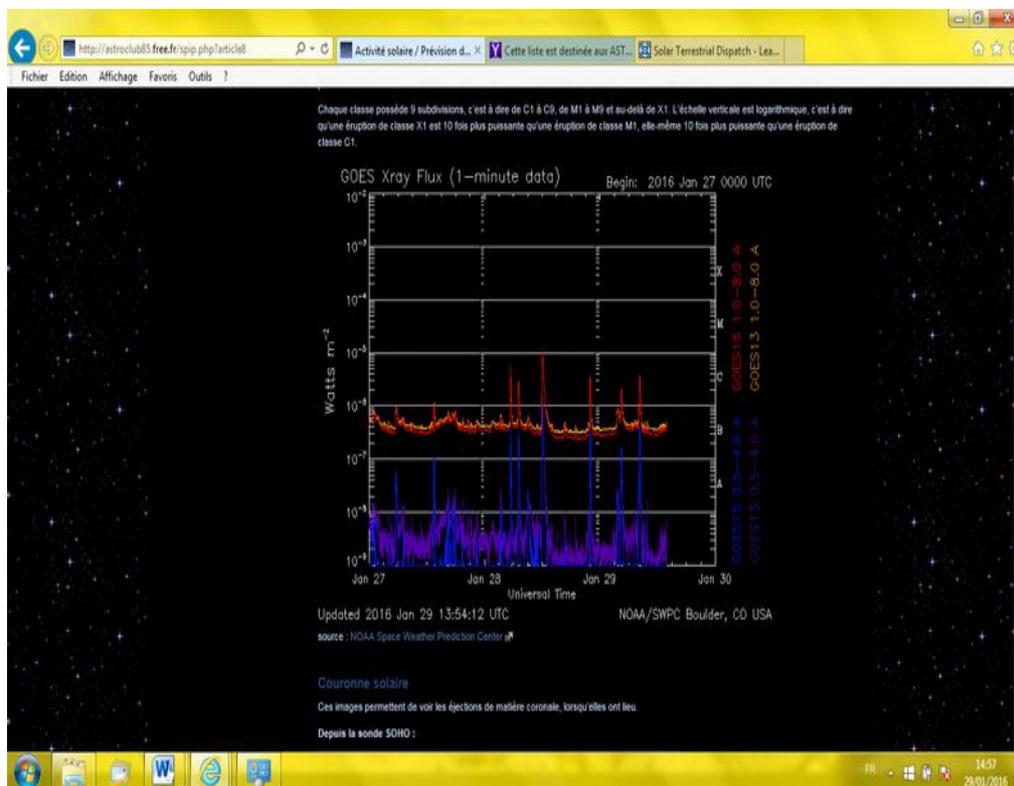
Il est possible de prévoir l'apparition d'aurores grâce à différentes mesures physiques (indice Kp, la mesure de rayon X, la météo,..).



Toujours grâce aux données de la NOAA Space Weather Prediction Center, nous avons pu déterminer les effets de l'activité solaire sur le champ magnétique terrestre le 29 janvier. Cette activité se mesure sous la forme d'un indice noté Kp, allant de 0 à 9. Lorsque l'indice Kp atteint ou dépasse 5, on parle d'orage électromagnétique, de forts arrivages de particules solaires avec des vents

solaires très violents se manifestent, liés aux éruptions solaires. Le 29 janvier, l'indice Kp était seulement de 1, ce qui traduit une activité solaire très faible et donc l'apparition d'aurores polaires quasi-impossible.

Les éruptions solaires sont accompagnées de puissants rayonnements électromagnétiques, principalement des rayons X. Il nous est donc possible de prévoir l'apparition d'aurores polaires en mesurant les émissions de rayonnements électromagnétiques arrivant du soleil car une quantité importante de rayons traduit des éruptions solaires en grande quantité.



Ce graphique de la NOAA Space Weather Prediction Center mesure les émissions de rayonnements électromagnétiques du 29 janvier. Ce jour-là, elles ont atteintes la classe C3. Les rayonnements électromagnétiques sont classés dans différentes classes (A, B, C, M et X) et chacune possède 9 subdivisions (par exemple de C1 à C9). L'échelle verticale est logarithmique, c'est-à-dire qu'une émission de classe X1 est dix fois plus puissante qu'une émission de classe M1, elle-même dix fois plus puissante qu'une émission de classe C8, et

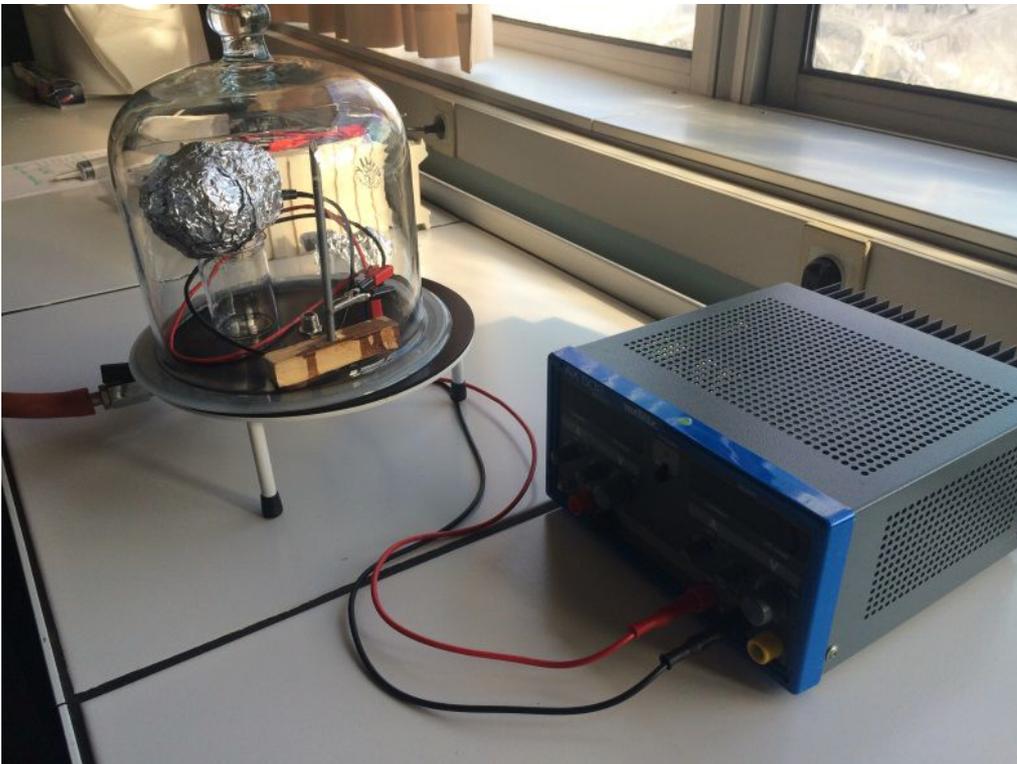
donc traduit à chaque classe une éruption solaire dix fois plus importante. Cependant, seules les émissions de classe X et M sont les plus puissantes et traduisent des éruptions solaires qui ont des effets notables sur la Terre (aurores polaires, perturbations radio...) alors que les éruptions de classe C ou en-dessous ont peu d'effets sur Terre.

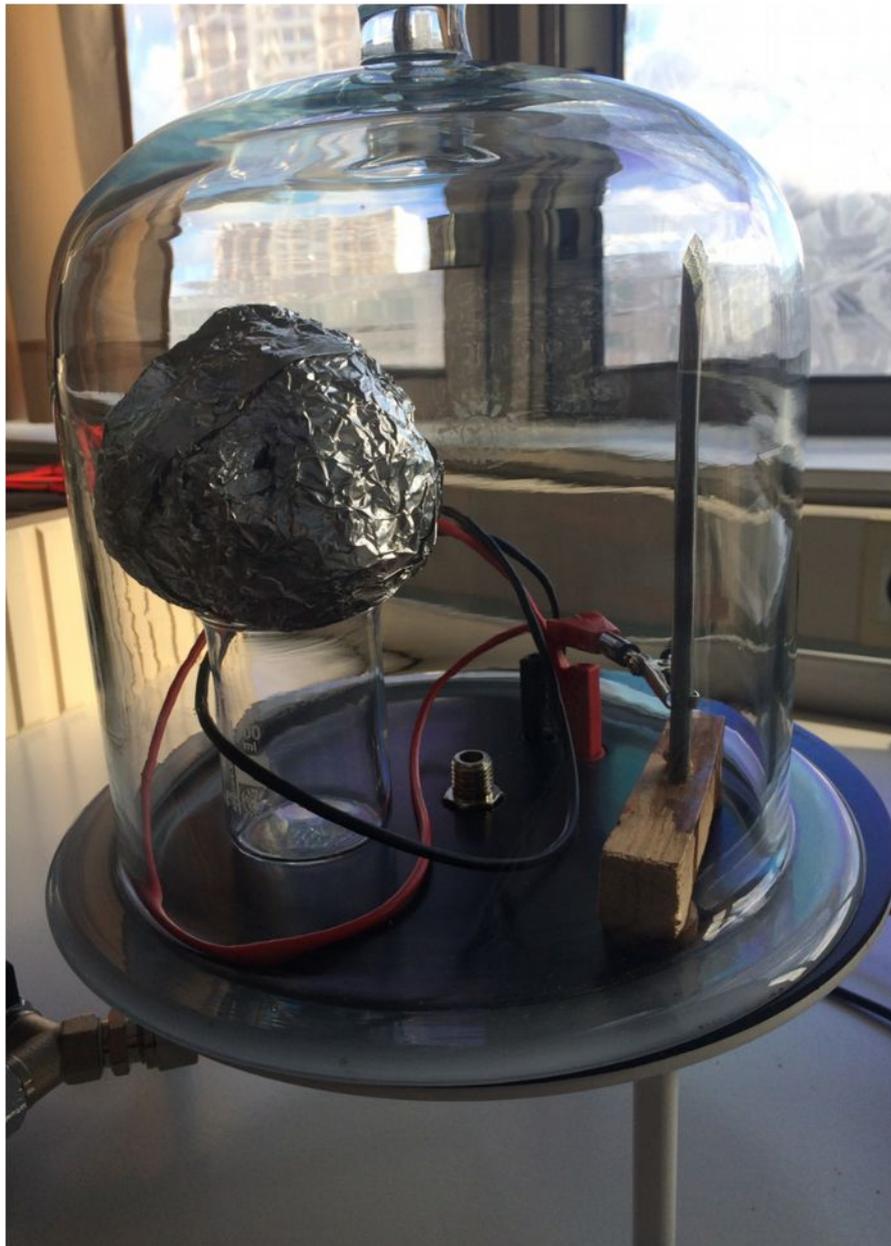
Expérience

Maintenant que nous savons comment se forment les aurores polaires et les différentes conditions qui nous permettent de mieux les observer, nous allons mettre en place une expérience qui va nous permettre de répondre à notre problématique : nous cherchons à modéliser la formation d'aurores polaires sur n'importe quelle planète du système solaire.

- Grâce à nos recherches, nous savons que l'une des grandes différences qui existe entre les planètes de notre système solaire est la composition de leur atmosphère, qui d'ailleurs est un paramètre très important dans les étapes de la formation des aurores polaires. Ainsi, nous allons modéliser la formation d'aurores polaires sous cloche dans différents gaz qui pourraient composer l'atmosphère de planètes.
- Aussi, pour qu'il y ait formation d'aurores polaires, il faut que les atomes qui composent le gaz soient excités. Pour ça, on met en place un champ magnétique pour qu'il y est échange de particules chargées : une pointe en acier d'un côté de la cloche, la cathode, qui serait le départ des particules chargées ; un aimant incliné (placé dans la boule d'aluminium qui représente la Terre) d'un autre côté de la cloche afin de modéliser le noyau terrestre et le champ magnétique qu'il crée autour de lui (tout aimant possède un champ magnétique).

Générateur
(30V) relié
à la
cathode et
anode de





Cloche en
verre

Boule en
aluminium
(avec un
aimant à
l'intérieur) +

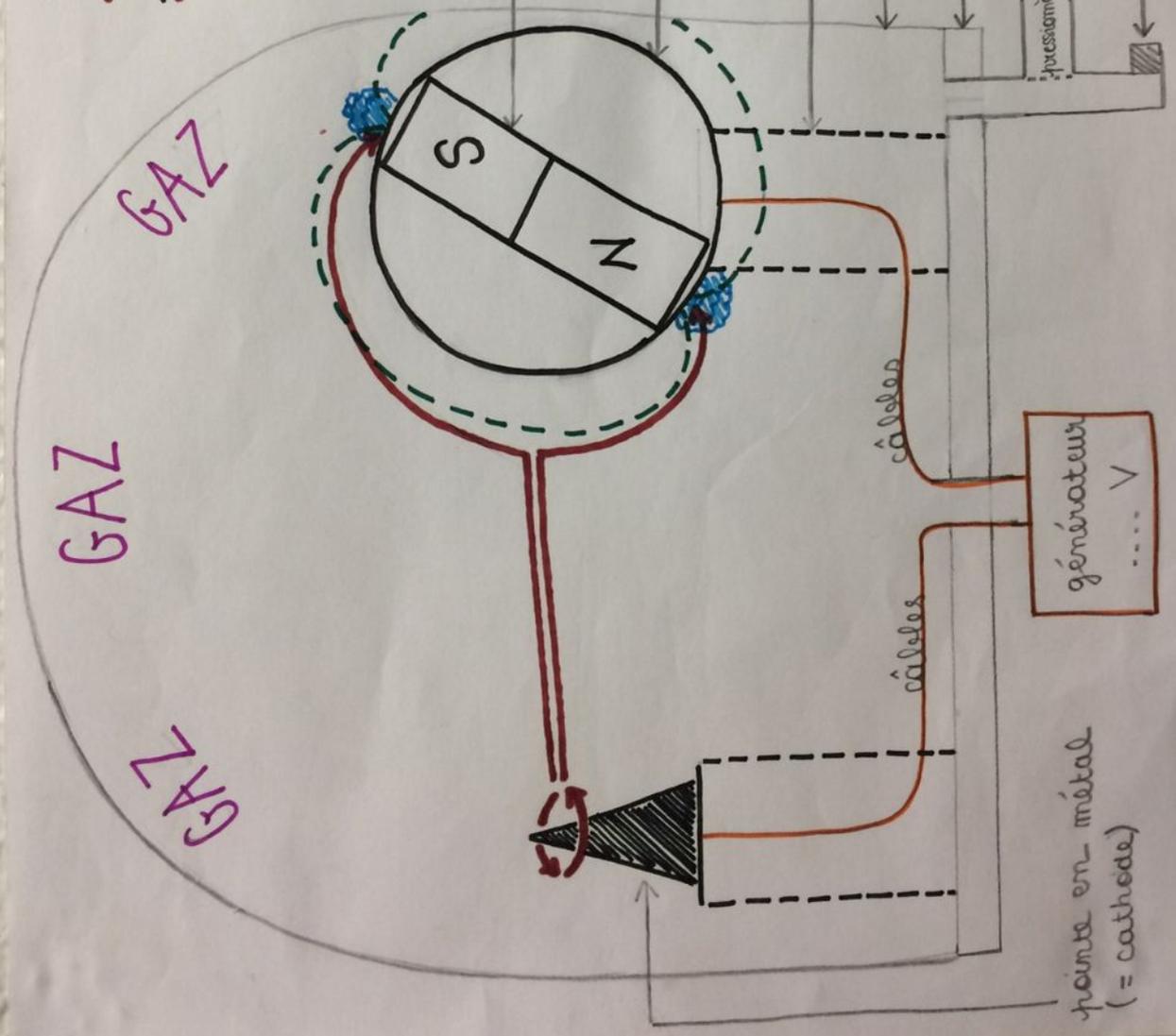
Pointe en
acier
(anode)

Support en
verre

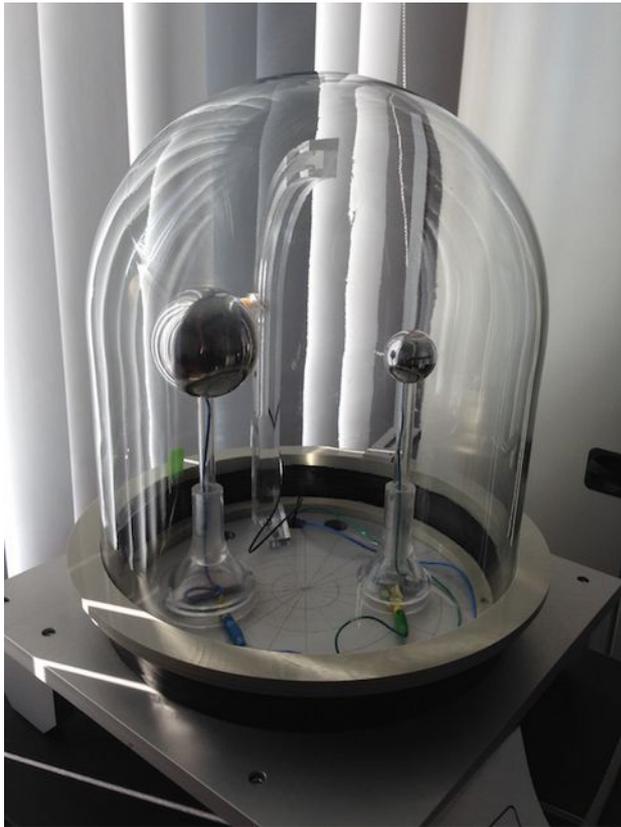
Câbles

On s'attend à observer des luminescences sur notre boule en aluminium au niveau des extrémités de l'aimant placé à l'intérieur de cette dernière, de couleur différente en fonction du gaz injecté sous la cloche.

Schéma de la modélisation
de la formation des
aurores polaires. ②



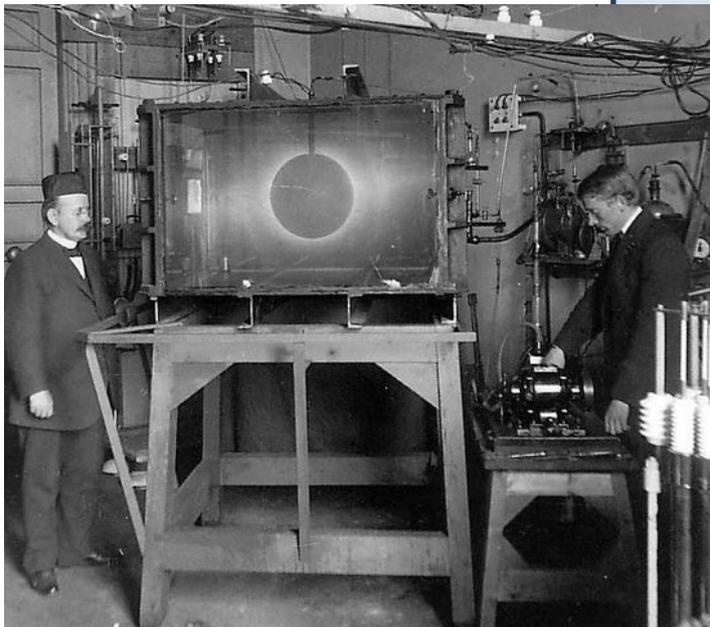
- déplacement des particules chargées.
- champ magnétique au moment de la luminescence (aurore).
- luminescence (aurore).
- au moment : modélise le champ magnétique terrestre
- sphère en aluminium : représente la Terre (= anode)
- supports (isolants)
- cloche à vide
- plateau
- pressiomètre
- pompe à vide



Cependant, dans ce cas, l'expérience a été réalisée sous haute tension (environ 2700V) pour voir une luminescence apparaître, chose impossible dans les locaux de notre lycée : nous nous limiterons donc à un générateur 30V. Ce paramètre pourrait empêcher le bon fonctionnement de notre expérience...

LE SAVIEZ-VOUS ?

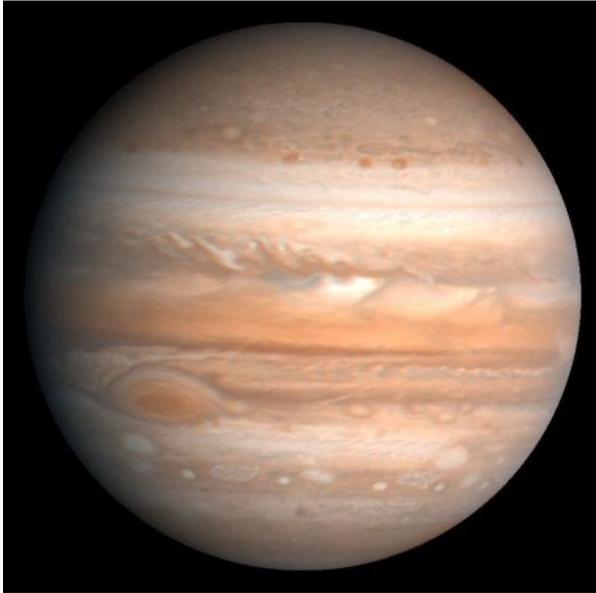
C'est le physicien norvégien Kristian Birkeland qui mit au point la première expérience appelée Terrella en 1895 qui lui a permis de comprendre la formation des aurores polaires. Un siècle plus tard, c'est Jean Lilensten et ses collaborateurs qui repensent totalement cette expérience.



ZOOM 🔍 : La Planetterella s'inspire de la Terrella de Birkeland et reste un démonstrateur d'aurores polaires mais sa très grande souplesse permet à présent de simuler quantité d'interactions entre étoiles et planètes.

No
Pl
po
au

Nous souhaitons réaliser plusieurs fois l'expérience car il est possible que nos résultats diffèrent en fonction du gaz utilisé (ou aucun), comme il est possible que la présence d'aurores polaires diffère en fonction de la composition de l'atmosphère des planètes du système solaire. Nous avons choisi 4 planètes à modéliser : la Terre, Jupiter, Mars et Mercure.



Jupiter : Jupiter est la plus grande planète du système solaire, elle se situe à 778 500 000km du soleil. Son atmosphère est composée principalement d'hydrogène et d'hélium. Cette planète possède un champ magnétique (généré par d'intenses courants électriques parcourant la couche d'hydrogène métallique liquide) 14 fois plus puissant que celui de la Terre, il se déforme comme le champ magnétique de la terre sous l'action des vents solaires. D'après ces informations, toutes les conditions sont réunies pour permettre la

formation d'aurores polaires.

LE SAVIEZ-VOUS ? : Jupiter abrite de nombreuses tempêtes qui agitent son atmosphère épaisse et nuageuse, la plus importante baptisée « grande tache rouge » fait rage depuis 300 ans.



Mars : Mars est une planète gazeuse située à 227 900 000 km du soleil. Les gaz composants l'atmosphère de Mars sont le diazote, l'argon et le dioxyde de carbone. Mars ne possède pas de magnétosphère comme notre planète, cependant elle possède un champ magnétique fossile, figé dans le sol. D'après ces informations, toutes les conditions sont réunies pour permettre la formation d'aurores polaire.

mercure : Mercure est la planète la plus proche du soleil se situant à 57 910 000km de celle-ci.

Cette planète possède un faible champ magnétique mais pas d'atmosphère.

LE SAVIEZ-VOUS ? Mercure, plus petite et plus dense des planètes du système solaire, a des températures qui varient de -173 degrés la nuit à 427 degrés le jour (étant donné qu'elle n'a pas d'atmosphère elle ne retient pas la chaleur la nuit).

LE SAVIEZ-VOUS ? : Mars abrite le plus haut sommet de tout le système solaire : le volcain Olympus Mons culmine à 26km de haut, soit plus de 3 fois la taille de l'Everest, pour un diamètre de 624 km.

D'après les informations récoltées, toutes les conditions sont réunies pour permettre la formation d'aurores polaires sur la Terre, Jupiter et Mars mais pas sur Mercure car elles possèdent toutes un champs magnétique et une atmosphère

sauf cette dernière.

Test 1 : dans l'air (modélisation de la Terre)

Test 2 : dans le vide (modélisation de Mercure qui ne possède pas d'atmosphère)

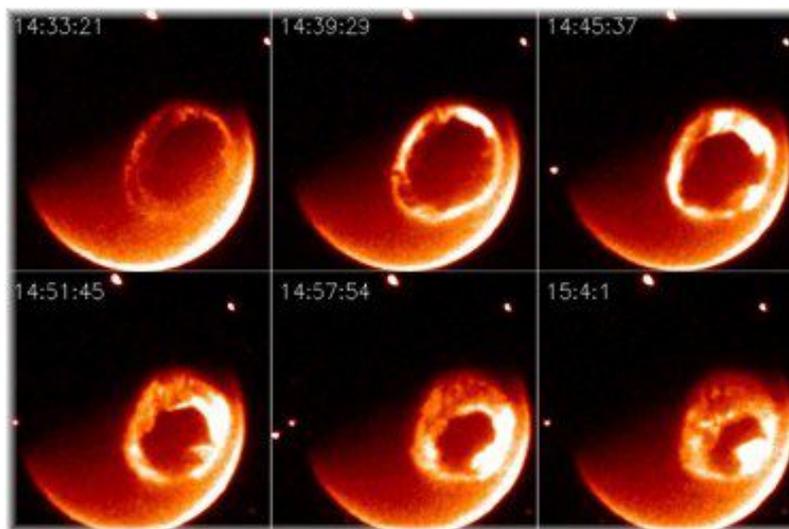
Test 3 : dioxyde de carbone (modélisation de Mars)

Test 4 : hélium (modélisation de Jupiter)

RESULTATS : Nous avons réalisé plusieurs fois l'expérience dans l'air puis dans le vide, mais nous n'observons aucunes luminescences... Nous pensons que cela est dû à une alimentation trop faible, au contraire du Planeterella. Cependant, même si notre expérience n'a pas fonctionné, nous pouvons nous référer aux images satellites :

Nous n'avons trouvé aucune image satellite ou de télescope concernant l'observation d'aurores polaires sur Mercure. Les aurores polaires ne sont donc pas admirables sur cette planète car l'inexistence d'atmosphère empêche le phénomène de se produire.

Aurores boréales sur Mars (images satellite Stéréo)

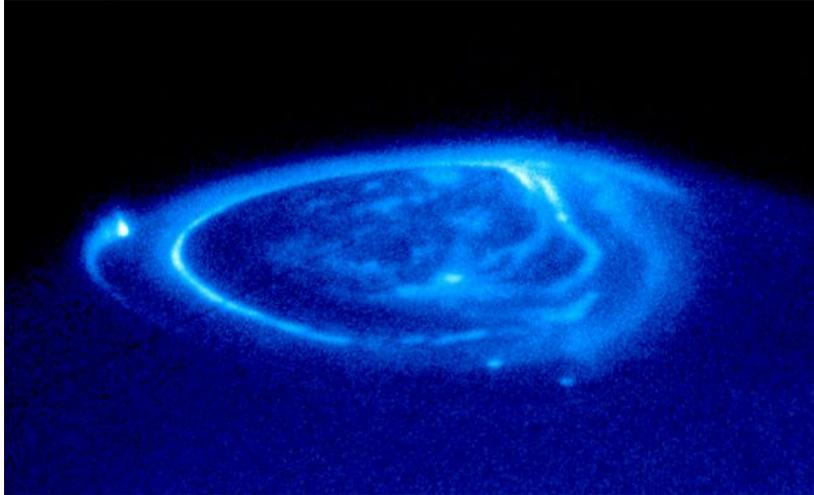


possède un champ magnétique fossile (au sol) c'est pourquoi les aurores polaires peuvent se former n'importe où sur la planète, pas seulement aux pôles magnétiques comme sur Terre. Les aurores polaires sont observables sur Mars mais elles ne sont pas observables à des endroits fixes comme

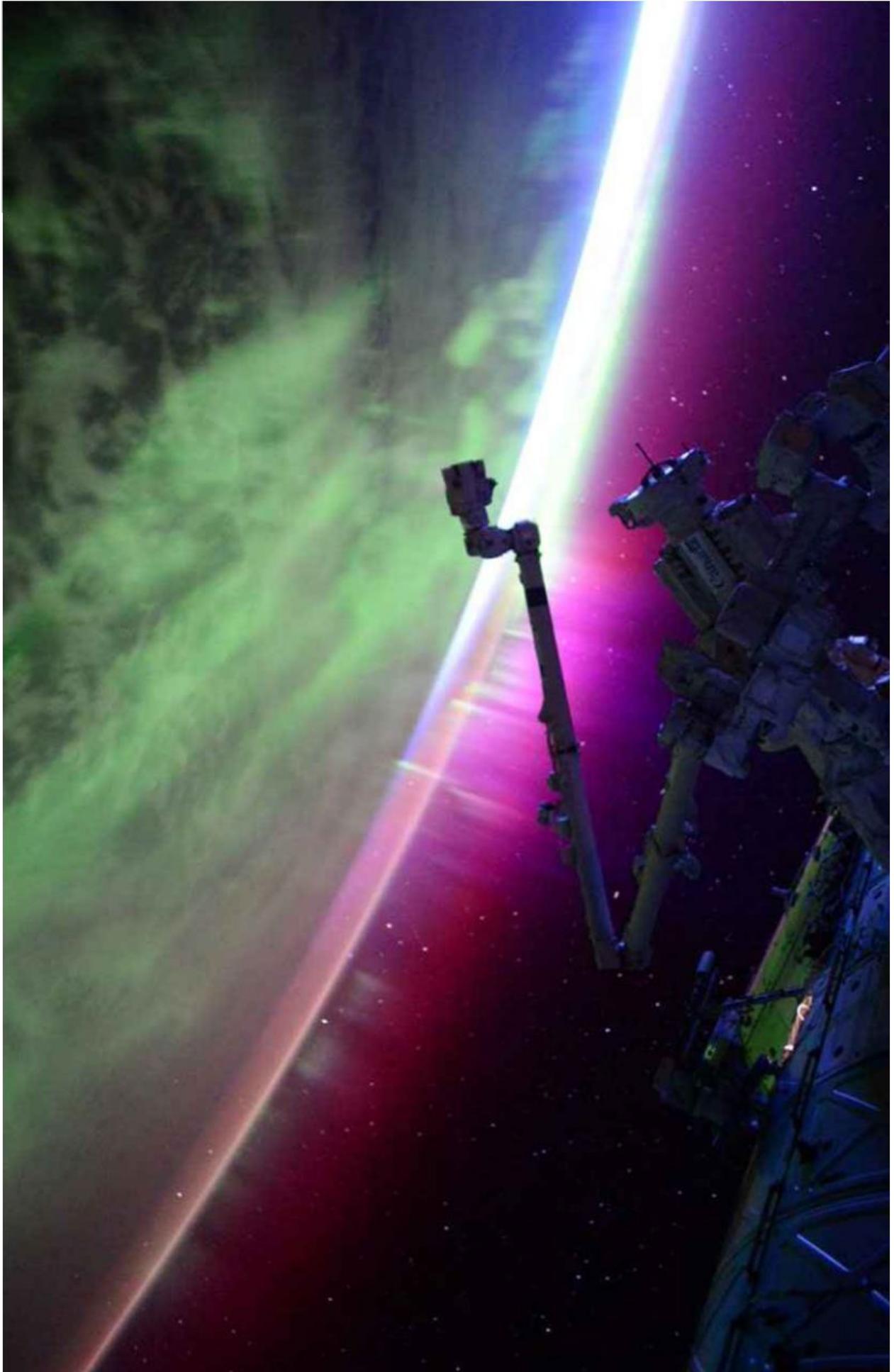
Comme pour Vénus, le contact est direct entre le vent solaire et l'atmosphère de la planète car elle

sur terre à cause de la particularité de son champ magnétique.

Ovale aurorale et aurores sur Jupiter (image télescope HUBBLE)



Possédant une atmosphère et un champ magnétique, l'apparition d'aurore polaire est donc possible sur Jupiter.



DU MYTHE A LA REALITE...

Légendes

Les aurores polaires ont toujours fasciné les hommes notamment dans les pays nordique, qui ont été intrigués par ces lumières provenant du ciel bien avant que des scientifiques puissent se pencher sur le sujet. Les hommes ont eu beaucoup d'imagination pour expliquer ce phénomène :

- dans les pays au nord de l'Europe, les aurores rouges représentaient le sang, la bataille.
- pour les Inuits d'Alaska, les aurores représentaient l'âme de leurs animaux fétiches (cerf, phoque, saumon, béluga) mais aussi un mauvais présage : ils partaient avec leurs couteaux pour tenter de les chasser.
- les indiens du Canada et des états nordiques américains percevaient ces lumières comme des géants les guidants dans leurs sorties nocturnes.
- pour d'autres Inuits, les aurores étaient de vrais dangers, ils pensaient qu'elles avaient le pouvoir de les décapiter : ils racontaient ces histoires sanglantes aux enfants pour les empêcher de jouer tard le soir, ils sifflaient pour les faire danser ou agiter leur fermetures éclairées pour les éloigner.



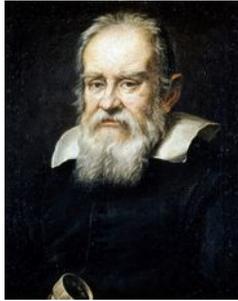
Dessin aurore chez les peuples

Inuits

Quelques dates clés

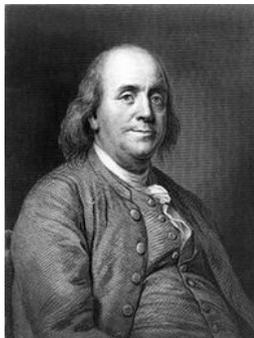
1619 : Galilée donne le nom de « aurore boréale » à ce phénomène, pour le moment seulement observé au Nord.

modèle réduit de simulation présenté à l'observatoire de Paris.



1773 : première observation d'aurores australes dans l'océan Indien par des marins.

1779 : Benjamin Franklin propose la théorie que les aurores proviennent de décharges électriques entre le ciel et la terre.



1863 : Auguste de la Rive émet l'idée selon laquelle le phénomène vient à la fois de l'électricité et du magnétisme terrestre. Il mit en place un



1879 : Becquerel propose l'idée que la précipitation de particules chargées, provenant du soleil et guidées vers les régions polaires par les lignes du champ magnétique terrestre, seraient à l'origine des aurores.

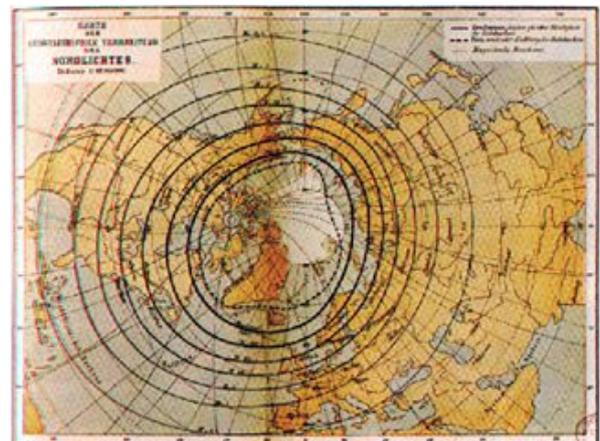
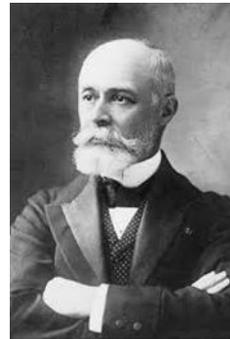
1881 : Herman Fritz complète la carte de Elias Loomis (1860) représentant la fréquence des apparitions des aurores boréales.

1901 : Christian Birkeland réussit à reproduire le phénomène dans une chambre à vide et à montrer que les aurores ont pour origine un flux de particules solaires guidées par le champ magnétique vers les pôles : le Terrella.

1957-1958 : Les satellites Spoutnik 1 et 2 confirment la théorie de Birkeland et révèlent l'existence de la magnétosphère (l'un à 100 km et

l'autre à 600 km d'altitude au-dessus de la Terre).

2008 : La NASA perce le mystère des aurores grâce aux satellites de la mission Thémis, qui observaient le phénomène depuis 1 an.





CONCLUSION

Les aurores polaires ont toujours captées l'attention de par leurs formes et leurs couleurs qui ont suscité stupéfaction, incompréhension et même peur mais qui suscitent encore aujourd'hui admiration et émerveillement.

Au cours des derniers siècles, les scientifiques se sont penchés sur le phénomène des aurores et ont réussi à comprendre leurs origines, expliquer et même simuler leur formation : ces luminescences sont le fruit d'impacts entre les particules solaires et les particules de l'atmosphère terrestre. Cependant, leur formation n'est possible que grâce à la présence de notre magnétosphère, générée par notre noyau terrestre, qui dirige les vents solaires vers les régions polaires, et bien sûr par la présence de notre atmosphère.

Aujourd'hui les aurores ont perdu une partie de leur mystère sur Terre mais continuent de susciter l'intérêt des chercheurs car il s'agit d'un spectacle qui n'est pas spécifique qu'à notre planète dans le système solaire : au cours de leurs voyages, les fusées et les sondes spatiales ont montré que les aurores polaires se forment également sur les autres planètes dotées d'un champ magnétique, d'une atmosphère et touchées par les vents solaires comme Mars, Saturne, Jupiter, Neptune ou encore Uranus...

Les aurores ne seraient plus seulement un spectacle à admirer mais représenteraient bientôt un futur outil de travail pour les chercheurs afin de découvrir d'autres planètes à explorer. En effet, bien que les planètes de notre système solaire et au-delà aient été découvertes, leur connaissance n'est pas complètement établie, du fait de leur éloignement par rapport à la Terre. Des astronomes de l'Université de Leicester au Royaume-Uni ont expliqué que ces aurores pourraient très bientôt permettre de détecter de nouvelles planètes grâce aux futures générations de télescopes car en effet les aurores génèrent des ondes qui peuvent être désormais détectées.

MEDIAGRAPHIE

Sites internet :

- Le secret des aurores boréales. Bandit de nuit. [En ligne] Gilles Boutin, date non communiquée

www.banditdenuit.com/apropos22.htm

- Les aurores polaires. TIPE : terre et espace. [En ligne] Lycée Lalande de Bourg en Bresse, 2000.

<http://mp01.free.fr/aurores2>

- Pourquoi y a-t-il des aurores polaires ?. Techno parano ! [En ligne] Hugo Eliévand, 2001.

<http://cyberzoide.devloppiez.com/pourquoi/index.php3?page=aurore>

- BERT Sylvain / PIGET Baptiste. Les éruptions solaires. TIPE : terre et espace. [En ligne] Lycée Lalande de Bourg en Bresse, 2000.

<http://mp01.free.fr/soleil/erupsol.htm>

- L'atmosphère et la magnétosphère de la Terre. Astronomie et Astrophysique. [En ligne] Olivier ESSLINGER, 2003-2016

www.asronomes.com/le-système-solaires-interne/latmosphere-et-la-magnetosphere/.

- Les aurores polaires. Futura-Sciences [En ligne] Philippe MOUSSETTE, 2003

www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/dossiers/d/astronomie-aurore-boreales-299/

- <http://www.astrosurf.com/quasar95/exposes/aurores-polaires.pdf>
- DEBROISE Anne, SEINADRE Éric. Petit atlas des phénomènes naturels. Larousse, 2008, page 128
- MAMECIER A., BEAUX J-F. La Planète Terre. Nathan, 2010, page 159 (Repères pratiques).
- BOEHLY Audrey. La machine à fabriquer des aurores boréales. Sciences et avenir, juin 2014, n°808, page 44
- VALEUR Bernard. Lumière et luminescence. Belin, 2005, page 207
- GILBERTAS Bernadette. Le ciel sous haute surveillance. Ça m'intéresse, juillet 2012, n°....., page 80-82
- HAGENE Bernard. Découvrir les Planètes. Pocket, 1993, page 58-71 (EXPLORA)

Photos :

Page de couverture : Instagram @natgeotravel

Page 3 : Instagram @natgeotravel

Page 4 : Instagram @natgeotravel

Page 5 : Instagram @gopro

Page 6 : Instagram @nasa

Page 7 : <http://www.geoado.com/actualites/eruptions-solaires-3-jours-nuit-decembre-nasa-63963>

Page 8 : <http://csciences.weebly.com/le-magneacutisme.html>

Page 12 : https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Aurore_polaire

Page 19 : http://www.lpap.ulg.ac.be/planeterrella/index_f.html

<http://www.wikistrike.com/article-la-gravite-electrique-72219896.html>

Page21 :

Page22 : http://www.antonparks.com/main.php?page=mondes_creux_3

https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Aurore_polaire Aurore sur jupiter en ultraviolet

Page 23 : Instagram @nasa

Page 24 : <http://www.banditdenuit.com/apropos22.htm>

Page 25 : <http://www.maxicours.com/soutien-scolaire/histoire/5e/275160.html>

https://ast.m.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Franklin

http://www.cnes-observatoire.net/memoire/musee_manif/01_jep05_patrimoine-espace/45.html

Page 26 : <http://defigrandesecoles.lexpress.fr/ecs-iej-marseille/fukushima-25-aout-1908-mort-du-decouvreur-de-la-riadioactivite/>

<http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Fwfritz.html>

<http://astronomie.skyrock.mobi/3086438499-spoutnik-1-Sputnik-1;html>

REMERCIEMENTS :

Mme Clare (professeur de physique chimie), Mme Soubielle (professeur de SVT), Mme Blancard (documentaliste), M Keffer (professeur de physique chimie), Mme Dasilva (préparatrice en labo), M Figueres et ses élèves.

