



AURORES POLAIRES

TPE – Première S

FLEURY Nicolas – CHAIZE-RIONDET Clémence – ROTA Justine

Année 2011/2012

Lycée Les Eaux Claires

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Présentation du TPE et Historique

I- LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

- 1- L'origine du champ magnétique
- 2- La structure du champ magnétique
- 3- Les interactions entre le vent solaire et le magnétisme terrestre
→ *L'impact du vent solaire sur l'atmosphère terrestre*

II- LES AURORES POLAIRES

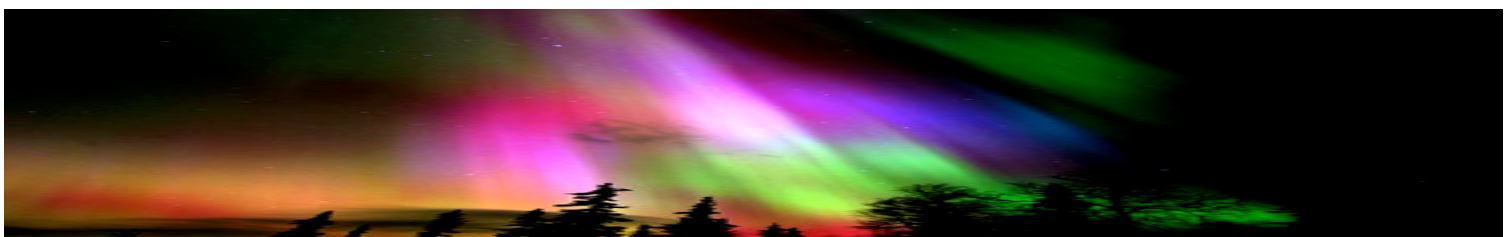
- 1- la formation des aurores
 - a. *Eruption solaire*
 - b. *Le parcours du vent solaire*
 - c. *Les aurores polaires*
- 2- Les caractéristiques du phénomène
 - a. *Altitude*
 - b. *Couleurs*
 - c. *Forme*

III- PARTIE EXPERIMENTALE

- 1- La Planèterrella
- 2- Expériences Diverses

CONCLUSION

Réponse à la problématique, annexes, bibliographie et remerciements



INTRODUCTION

De tout temps, les aurores polaires ont fasciné les hommes, et aujourd'hui, les avancées scientifiques et techniques nous permettent de mieux comprendre le phénomène. Cette année il été présenté au salon « EXPERIMENTA » de Minatoc la Planèterrella du professeur Jean Lilensten , un simulateur auroral. Aussi nous avons décidé de produire un travail sur les aurores polaires et le champ magnétique.

Comment les expériences de laboratoire ont permis de confirmer les hypothèses des scientifiques sur la formation des aurores polaires ?



Un peu d'Histoire...

Le mystère des aurores polaires est apparu il y a bien des années.

En 593 avant J-C, le grec Anaximène en aurait aperçu une et l'aurait décrite comme des « nuages de gaz enflammé ».

Plusieurs savants ont essayé d'observer et de comprendre ce phénomène.

Au XVIIe siècle, Galilée aurait été le premier à utiliser l'expression d'« aurores boréales », mais il semble qu'il n'en avait pas encore trouvé l'explication....

Au cours du XIXe siècle, plusieurs théories ont tenté d'expliquer, sans succès, le phénomène des aurores.



Ce n'est qu'au début du XXe siècle que le norvégien Olaf Birkeland commence à comprendre le phénomène : il associe les aurores avec des courants électriques créés par des particules solaires. Ses recherches l'ont poussé à recréer un phénomène auroral artificiel grâce à l'expérience de la Terrella. Plus récemment le Docteur Lilensten de l'université de Grenoble a mis au point un dispositif plus perfectionné que l'expérience de Birkeland : la Planéterrella.

↑ *Kristian Van Olaf Birkeland, scientifique Norvégien inventeur de la Terrella.*

Source : Wikipédia

Depuis les 30 dernières années, les instruments de mesure satellites ont permis de comprendre la relation entre les tâches solaires et les aurores.

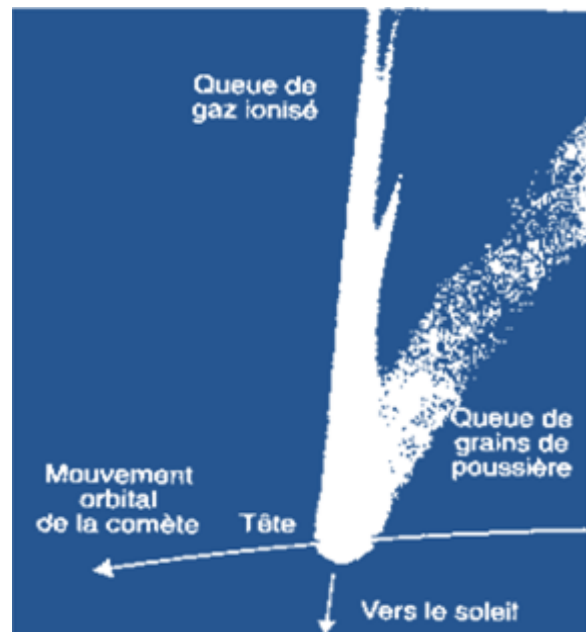
Les aurores polaires ont fait et font l'objet de nombreuses légendes et croyances.

Un élément important de l'histoire : la découverte du vent solaire

Une comète est un noyau de glace et de poussières cosmiques qui, en s'approchant du soleil se réchauffe et libère des gaz sous forme de longues traînées : la queue de la comète.

En étudiant certains clichés d'une comète, l'astronome allemand Birmann observe que la queue est dédoublée (alors que logiquement il ne devrait y en avoir qu'une, orientée selon le mouvement de la comète).

- La première partie est composée de poussières qui suivent la trajectoire de la comète.
- La seconde est constituée d'un plasma aligné dans une autre direction. « *Les particules chargées de cette dernière subissent la pression d'un phénomène physique inconnu qui explique le dédoublement de la queue.* » → Birmann Ce phénomène inconnu est en fait le vent solaire. (Voir définition ci-après)

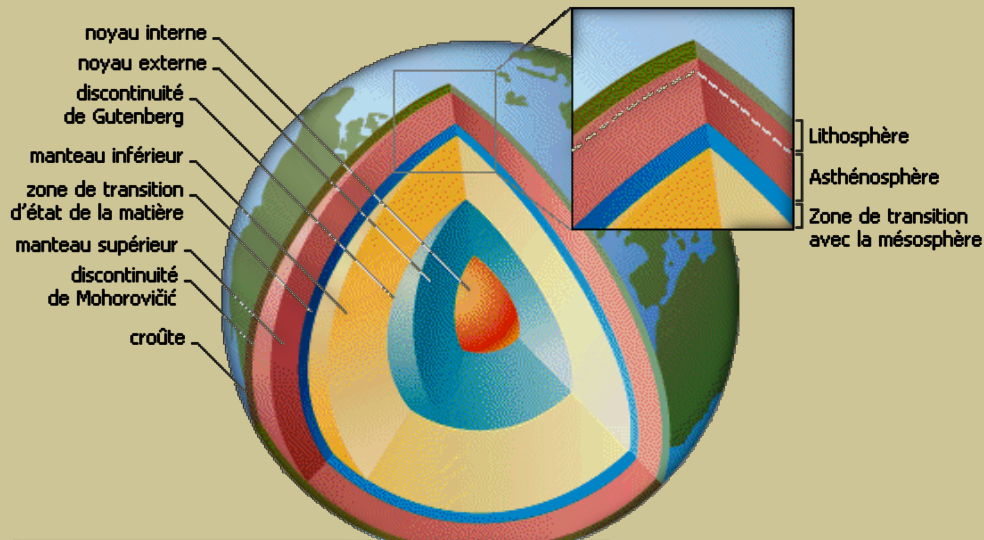


Négatif d'une photographie de comète où l'action du vent solaire est visible ↑

LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

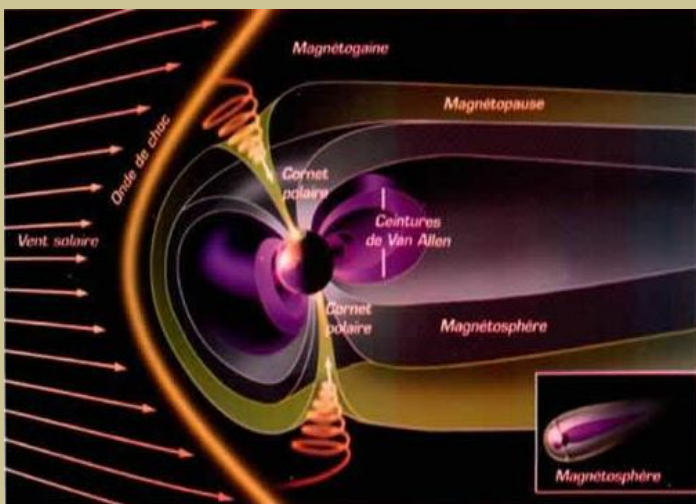
1-L'origine du champ magnétique

La Terre, notre planète, est composée de plusieurs couches de roches (à différents états) disposées de manière concentrique. Elle ne s'est pas entièrement refroidie après les divers événements de sa genèse (collisions, agglomérations de particules...) A mesure que l'on s'approche du centre de la planète, la température augmente et, par endroits, les roches sont plus ou moins ductiles. Aussi, on découpera le globe en différentes couches aux propriétés physicochimiques variées...



Encyclopédie Encarta, © Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

La Terre est issue de l'explosion d'une supernova il y a plus de 6 milliards d'années. Au cours de sa formation, des débris stellaires se sont agglomérés et ont petit à petit donné naissance à une planète. Le noyau interne solide de ce corps céleste est cependant moins chaud que sa périphérie liquide. Alors, des échanges thermiques se sont mis en place et sont à l'origine de courants de convection* des éléments chargés les plus lourds (dont le fer) autour du noyau. Ces mouvements nucléaires des éléments ferromagnétiques dotent la Terre d'un « bouclier magnétique » : Le champ magnétique terrestre*. (*Hypothèse la plus plausible qu'on ait posée par les scientifiques quant à la formation du champ magnétique*).



Lexique :

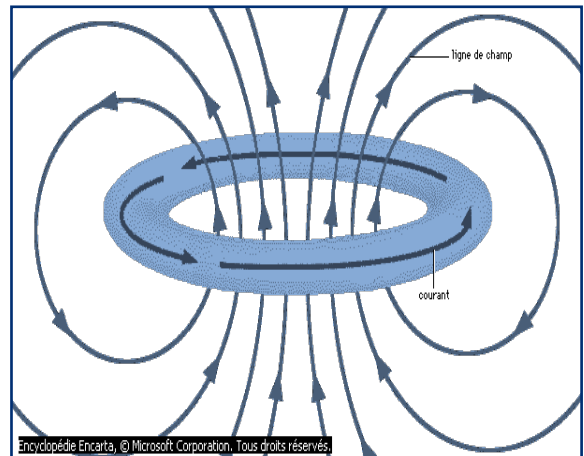
**Champ magnétique terrestre* : lignes de champ provoquées par l'aimantation du noyau de la Terre.

**Courants de convection* : flux thermiques entraînant un déplacement de la matière.

Source : <http://mayerwin.free.fr/?p=magnetisme.html> ↑

2- La structure du champ magnétique

De nombreux astres possèdent un champ magnétique qui s'organise à partir des pôles (bipolarisation de l'astre) sous forme de lignes et fait de son astre un gigantesque aimant avec un pôle Nord et un autre Sud. Ces lignes partant du pôle Nord pour rejoindre le pôle Sud forment des couches concentriques autour de la terre ; parmi ces couches on trouve la ceinture Van ALLEN (qui est la plus proche de l'atmosphère) ou encore la magnétosphère ou magnétopause (une des couches situées en périphérie).



L'illustration ci-dessus montre que lorsqu'un courant (électrique) est mis en place, on assiste à la formation d'un champ magnétique. Aussi, on définira le magnétisme comme « l'action à distance d'un phénomène électrique ». ↑

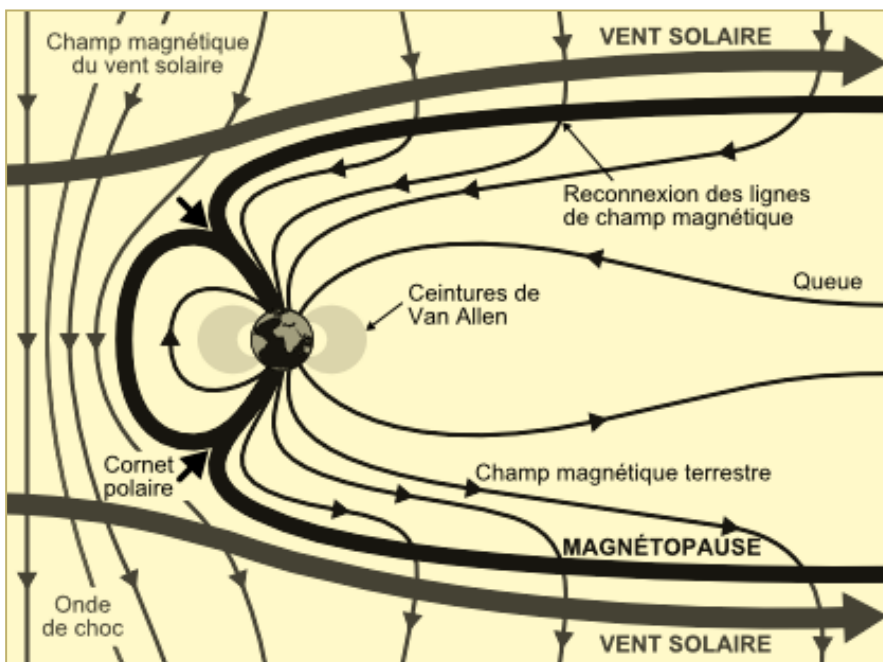


Schéma structural du champ magnétique

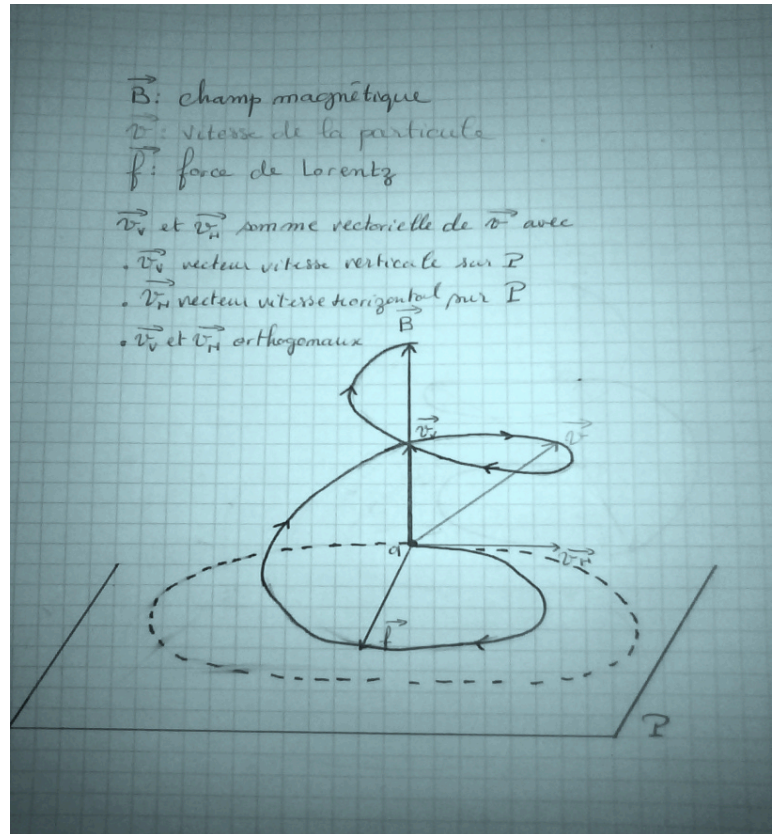
Source : voir annexe

3-Les interactions entre le vent solaire et le magnétisme terrestre

Certaines particules du vent solaire ne passent pas sur la ceinture de Van Allen et sont déviées sur une ligne périphérique du champ magnétique où elles perdent de la vitesse.

En revanche, les électrons et les protons en rotation sur la ceinture de Van Allen (les plus rapides) remontent jusqu'aux pôles. Les particules ne solaires suivent pas linéairement les lignes du champ magnétique mais s'enroulent autour d'elles. Ce phénomène physique s'explique grâce à la force de Lorentz et aux autres forces impliquées.

La particule solaire qui arrive à proximité du champ magnétique intense de la terre est soumise à la force de Lorentz. On peut décomposer les vecteurs vitesses de ces particules en somme de deux vecteurs. Les particules vont donc se mettre à tourner (entraînées par la force de Lorentz) tout en remontant hélicoïdalement sur les lignes grâce à la composante verticale du vecteur vitesse (voir figure ci-contre).



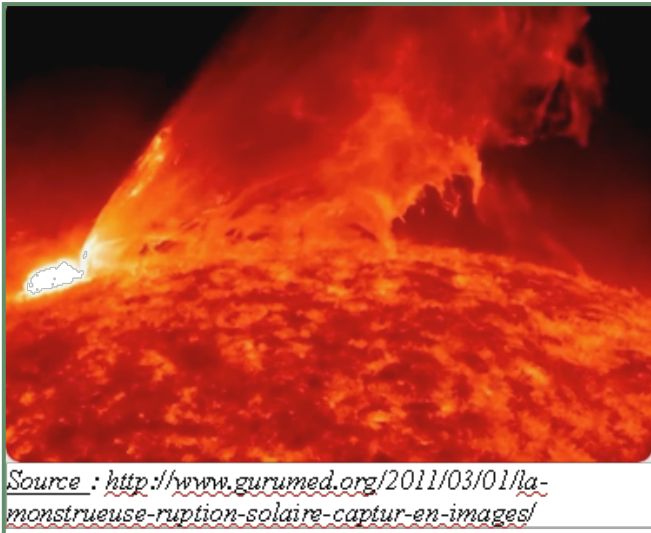
• L'impact du vent solaire sur l'Atmosphère terrestre

Alors que les protons et les électrons pénètrent dans l'atmosphère terrestre, ils réagissent avec les molécules présentes dans l'air. De cette réaction naissent des phénomènes lumineux appelés aurores polaires. Mais par cette action le vent solaire érode notre atmosphère même si la magnétosphère stoppe la plus part des particules. On estime qu'environ 5kg d'atmosphère disparaît toute les secondes. A ce rythme, il faudrait plusieurs fois la vie du soleil pour épuiser complètement l'atmosphère.

LES AURORES POLAIRES

1-La Formation Des Aurores

- L'éruption solaire



Lexique :

* **Chromosphère :** Couche externe d'une étoile pouvant atteindre 10 000 km de profondeur à température élevée en surface et moindre en profondeur.

* **Énergie cinétique :** Énergie acquise par l'augmentation de la vitesse d'un objet.

* **Connexion gravitationnelle :** Attraction entre deux objets massifs diminuant quand la distance entre ces deux objets augmente.

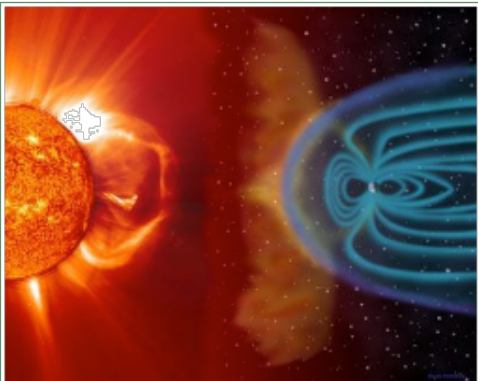
* **Tâches solaires :** Zones sombres plus ou moins grandes visibles à la surface du soleil, leur température est moindre que celle de leur environnement ambiant, elles sont mobiles et s'expliquent par le déplacement de matière formant les protubérances solaires.

* **Interaction électrostatique :** Action réciproque entre deux entités chargées A et B répulsive ou attractive suivant leur charge.

r une projection de particules solaires dans l'espace. La surface du soleil (chromosphère*) est composée de gaz ionisés à température très élevée (4000 à 10 000 °C) ce qui provoque une forte vitesse d'agitation thermique des électrons. Cette énergie cinétique* les délie donc de leur connexion gravitationnelle* avec le soleil formant ainsi des protubérances solaires : arcs de matière à la surface du soleil ayant à chaque base une tâche solaire* (déchirures solaires). La rencontre de deux protubérances donne lieu à une éruption solaire ; c'est la différence de pression entre la couronne solaire (très élevée) et l'espace interplanétaire (très faible voir nulle) qui explique la propulsion de particules à très grande vitesse hors de la surface du soleil vers l'espace. De part leur charge négative, les électrons attirent protons et ions positifs (particules présentes dans la chromosphère solaire) dans leur course grâce à l'interaction électrostatique*. Ce

phénomène s'appelle une éruption

sol
air
e,
l'or
igi
ne

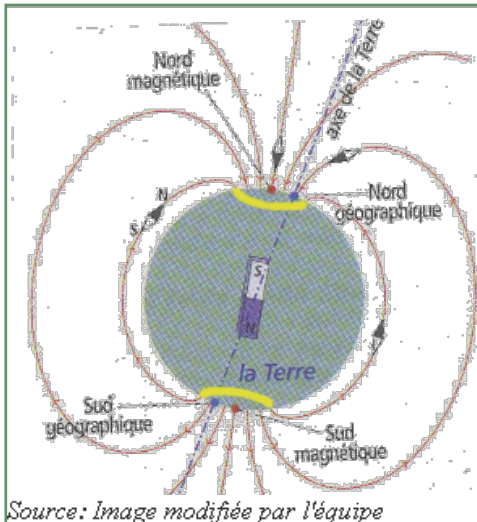


Source:
<http://www.odysseespace.fr/terreb.php>



Source: <http://www.lpde.fr>

solaire.



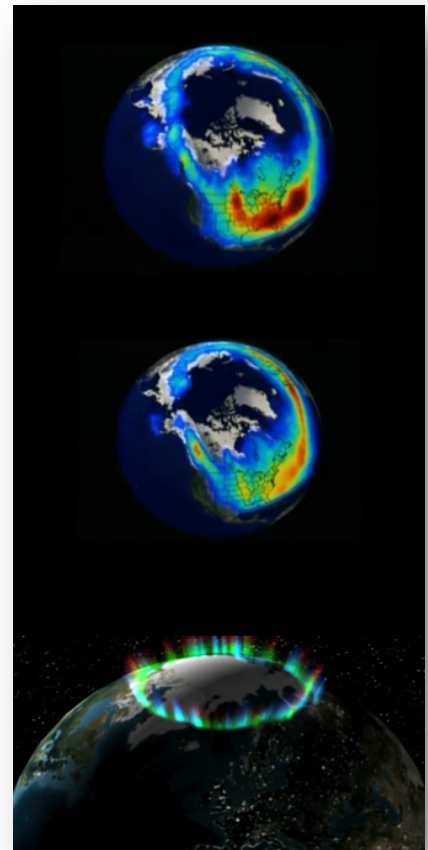
Source: Image modifiée par l'équipe

solaire

- Le parcours du vent

Les particules constituant le vent solaire arrivent à grande vitesse face à la première barrière magnétique de la terre (250 km/s à 1000 km/s). Cette barrière délimitant la magnétosphère* terrestre est située à des milliers de km de notre planète, elle englobe toutes les autres forces magnétiques générées par la terre. Lors de cette rencontre, ions protons et électrons sont détournés, mais par la force du choc certaines de ces particules parviennent à entrer dans la magnétosphère terrestre.

Le vent solaire ayant perdu de la vitesse au moment de la collision se rapproche de la terre jusqu'à rencontrer un anneau circulaire parallèle à l'équateur appelé : La ceinture de Van-Allen*. A ce moment les ions et protons vont se mettre en orbite autour de la terre parallèlement à cet anneau tout en gagnant de la vitesse. Les particules vont ensuite s'aligner aux lignes de champs magnétiques de la terre qui les guideront au niveau des ovales auroraux* (visibles en jaune sur le schéma) situés autour des pôles



Nord et Sud de la planète. C'est donc dans cette zone que nous verrons apparaître les majestueuses aurores polaires !

Le où est confiné le champ

Zone magnétique qui entoure la Terre et qui piège les particules cosmiques à très haute vitesse en orbite autour de la Terre.

Les aurores polaires à la surface de la Terre sont causées par les particules magnétiques rejoignant les pôles magnétiques polaires sont visibles.

Sur les images satellites ci contre, les couleurs jaunes et rouges indiquent que la concentration en particules solaire dans l'atmosphère est assez importante. Ces zones particulièrement propices aux réactions chimiques provoquant les aurores constituent l'ovale auroral nord de la terre.

Source : <http://www.universcience.vod.fr/media/651/satellite---aurores-boreales.html>

• Les aurores polaires

Il y a deux types d'aurores polaires : celles visibles autour du pôle magnétique Nord « aurores Boréales » et celles visibles autour du pôle magnétique Sud « aurores Australes ». Les deux se forment quasiment simultanément.

Les aurores sont perceptibles sur un certain périmètre plus ou moins vaste (généralement entre 65 et 75° de latitude) selon l'intensité de la vitesse à laquelle arrivent les particules solaires. Ce périmètre nommé « ovale auroral » s'étend sur le Canada, L'Alaska, le Nord de la Russie, la Finlande, la Suède, la Norvège pour l'exemple des aurores

Boréales. En cas d'éruption solaire intense, l'arc auroral peut s'étendre à des régions plus proches de l'équateur mais ce cas reste tout à fait exceptionnel. Les aurores australes sont visibles majoritairement sur le cercle antarctique, sur les Terres de Wilkes et Enderby et un peu au Sud de l'Argentine.

Nous savons que le Nord géographique n'est pas situé au même endroit que le Nord magnétique, de même pour le pôle Sud, les ovales auroraux sont donc décalés par rapport aux pôles géographiques car ils se forment en fonction des pôles magnétiques.

Mais qu'est ce qu'il se passe réellement à l'arrivée des particules solaires dans notre atmosphère pour parvenir à ce phénomène fabuleux ?

Après 2 à 4 jours de voyage le vent solaire entre dans l'atmosphère et libère son énergie sous forme de lumière. Pour être plus précis, l'énergie emmagasinée dans le vent solaire par sa vitesse génère l'excitation des atomes constituant l'atmosphère terrestre lors de leur collision. C'est par la désexcitation* de ces atomes que sont produits des photons (particules de la lumière) illuminant le ciel en couleur jaune, verte, magenta et bleu.



Lexique :

*Désexcitation atomique : Pour revenir à leur état fondamental, les électrons excités émettent un photon (radiation lumineuse).

2-Les caractéristiques du phénomène

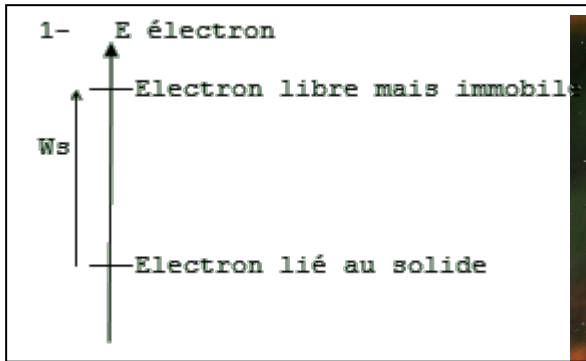
- L'altitude

Le phénomène des aurores polaires ne peut se produire qu'en présence d'atmosphère et de champ magnétique. Si une planète possède ces deux conditions, alors



il peut s'en produire une (On en trouve sur Jupiter et Saturne). En revanche, sur des planètes comme Mars (qui ne possède pas de couche atmosphérique) on n'observe pas de phénomènes auroraux.

Sur terre, les aurores polaires se produisent dans l'atmosphère et la haute atmosphère (de 90 à 1000km). La plupart ont lieu dans la « zone aurorale » qui se trouve entre 90 et 150km. Les plus visibles sont entre 100 et 200 km car c'est à cette altitude que l'intensité lumineuse est la plus forte.



Les couleurs sont le résultat de contacts dans la haute atmosphère terrestre. Ces collisions impliquent l'arrivée de particules solaires (protons et électrons) qui vont heurter les atomes d'azote, d'hydrogène et d'oxygène présents dans l'air. L'apport d'énergie des particules solaires à ces derniers va avoir pour



• Les couleurs

conséquence de provoquer des transitions énergétiques sur leurs électrons. Lorsque suffisamment d'énergie a été apportée, un ou plusieurs électrons sont éjectés des atomes (ionisation*) et des radiations lumineuses sont émises lorsque les autres électrons excités reviennent à leur niveau fondamental. Ainsi donc les aurores polaires sont dues à l'ionisation des atomes aériens par les particules du vent solaire.

Lexique :

*Excitation atomique : Les atomes ont des niveaux d'énergie. Lors d'un apport énergétique sur un atome, les électrons changent de niveau d'énergie. On dit que l'atome est dans un état excité.

*Ionisation : Lors d'un apport énergétique important sur un atome les électrons changent de niveau d'énergie et certains sont éjectés du nuage atomique. On appelle cet état atomique l'ionisation.

Pour libérer un électron, il faut lui fournir une énergie appelée « travail d'extraction » noté W_s .

$E \text{ apporté} = W_s \rightarrow$ libre mais sans vitesse.

$E \text{ apporté} > W_s \rightarrow$ libre avec vitesse.

$E \text{ apporté} < W_s \rightarrow$ rien ne se produit.

↑ Source : TP de physique n°5 (B. PIN lycée les eaux claires)

✚ Plus la vitesse d'arrivée des éléments du vent solaire est importante, plus ils vont loin dans l'atmosphère, et inversement. Cette vitesse a donc une influence sur la couleur des aurores.

- ✦ *L'altitude, la vitesse d'arrivée et l'excitation des éléments en cause ont un impact sur les couleurs observés.*
- ✦ *Les aurores sont présentes de jour comme de nuit mais ne peuvent être observées que dans l'obscurité.*
- ✦ *Les couleurs observées dépendent des apports énergétiques. A chaque couleur correspond une radiation de longueur d'onde λ associée à une transition énergétique discrète (particulière). (Voir annexe)*

On remarque différentes réactions en fonction des atomes présents dans l'atmosphère.

La réaction d'un proton ou d'un électron avec un atome d'azote produit une couleur rouge ; plus haut, avec un atome d'oxygène, la réaction produit une couleur rouge foncée ; à 100 km d'altitude, avec un atome d'oxygène la réaction émet une raie de couleur jaune-vert et, encore à 100 km, avec une molécule d'azote la réaction émet une raie violette ou bleu.

- Les formes

On observe différentes formes d'aurores polaires.

- ✦ L'arc, est une courbe régulière dont la bordure inférieure lisse s'étend d'un bout à l'autre de l'horizon.
- ✦ La bande, elle est semblable à un arc mais sa bordure inférieure forme des replis.
- ✦ La couronne, ce sont des arcs ou des bandes vus directement de dessous. La lumière semble être projetée en faisceau dans toutes les directions.
- ✦ La raie, est un rayon ou un trait de lumière suspendu plus ou moins verticalement.
- ✦ La tache, est une zone de luminosité aurorale de faible extension ayant l'apparence de nuages.
- ✦ Le voile, est une zone lumineuse de grande extension et de forme diffuse couvrant parfois le ciel entier.
- ✦ Les aurores sont de formes et de tailles variables.

PARTIE EXPERIMENTALE

Aurore polaire sous forme de bande, sa couleur jaune-verte indique qu'elle est émise par des atomes d'oxygènes à environ 100-120 km →



La Planèterrella

- Principe

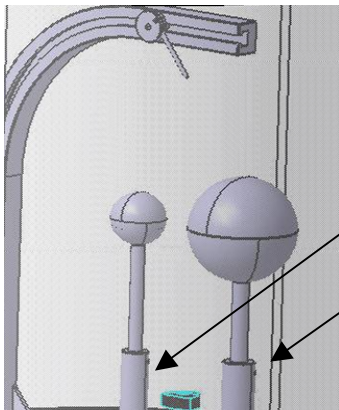
Inventé par le docteur Jean Lilensten, planétologue de l'université de Grenoble, la Planèterrella est un dispositif destiné à recréer artificiellement des phénomènes auroraux. L'expérience se déroule sous une cloche à vide (non total) permettant de retrouver les conditions physiques (pression, température ...) de la haute atmosphère terrestre. Un générateur projette via une buse (canon à électrons) des particules vers deux sphères magnétisées dans l'atmosphère confinée. Les aimants puissants que contiennent ces sphères les dotent de champs magnétiques semblables à ceux de la terre et d'une étoile. Les particules électroniques captées par les divers champs entrent en collision avec les quelques atomes aériens restants. Ceux-ci entrent alors dans un état excité qui se manifeste visuellement par des arcs lumineux (des phénomènes auroraux).

✦ L'expérience de Jean Lilensten se base sur une autre expérience du planétologue norvégien Birkeland : la Terrella.

- Pratique

Le vide fait par le compresseur dans la cloche est de l'ordre d'un centième d'hectopascals c'est-à-dire le niveau de pression enregistré à 90 km d'altitude. Pour contrôler cette pression permanente, il sera utilisé un capteur de pression.

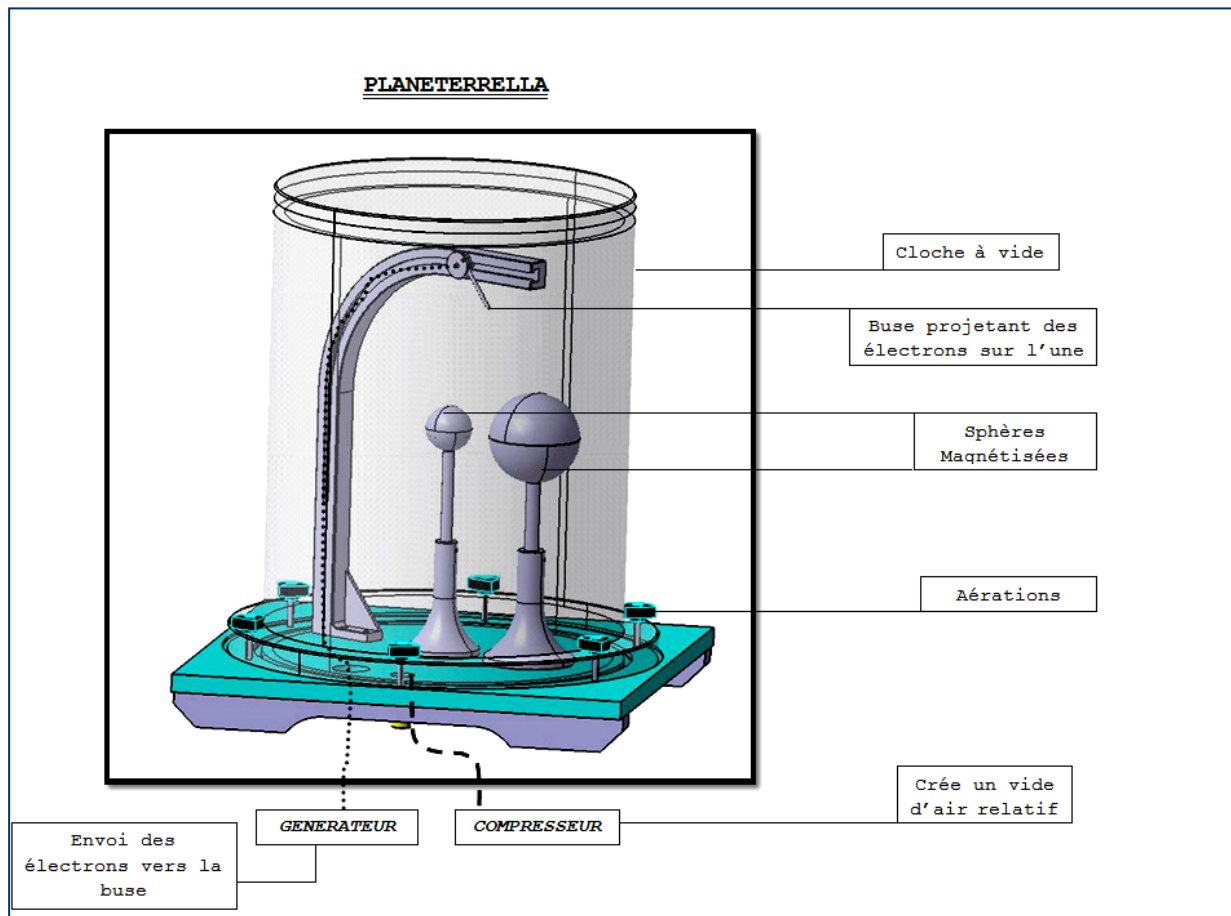
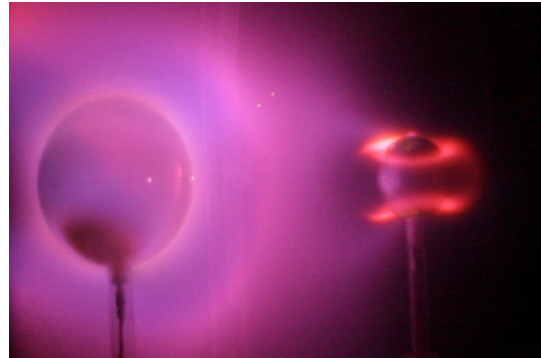
Plusieurs cas peuvent être étudiés avec la Planéterrella :



✦ Le cas où la petite sphère est une planète :

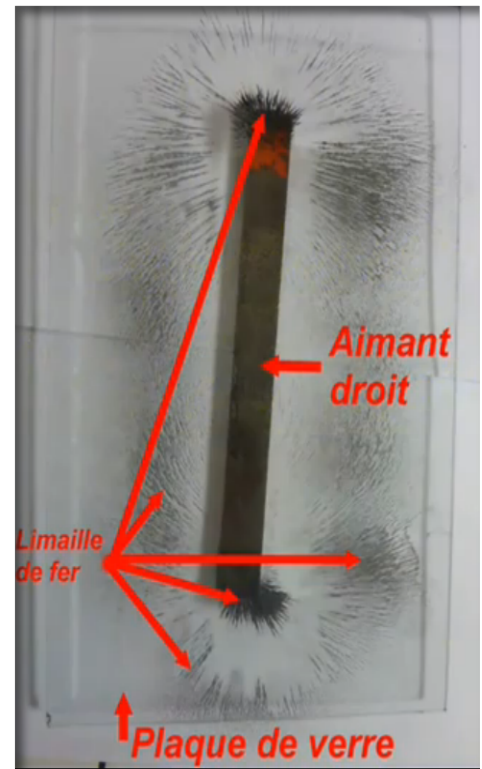
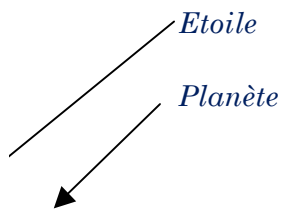
Planète

Etoile

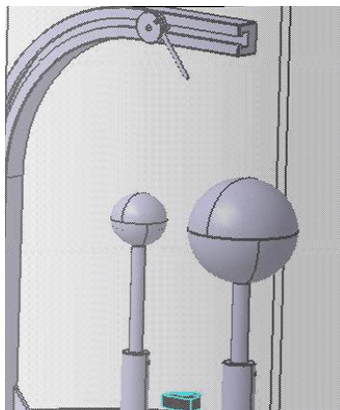


Des électrons sont éjectés par la buse et se mettent à tourner autour de la grosse sphère puis s'approchent de la petite sphère grâce à son champ magnétique. Ces particules entrent en collision avec les atomes d'azote de l'atmosphère puis sont précipités vers les pôles de la petite sphère, concentrés sur les ovales auroraux. C'est à cet endroit où les collisions sont les plus nombreuses et où il y a le plus de luminosité.

✚ Le cas où la petite sphère est une étoile :



Les électrons éjectés vont tourner autour de la petite sphère mais le champ magnétique de celle-ci plus intense que dans le premier cas va repousser les particules en mouvement sur l'équateur donnant un anneau très lumineux. Petit à petit, ces particules vont venir se déposer sur la grande sphère donnant une ceinture de rayonnement (radiations) assimilable à la ceinture de Van Allen sur la terre. Ces électrons entrent en collision avec les atomes d'azotes environnants en s'accumulant aux pôles pour former des cercles auroraux.

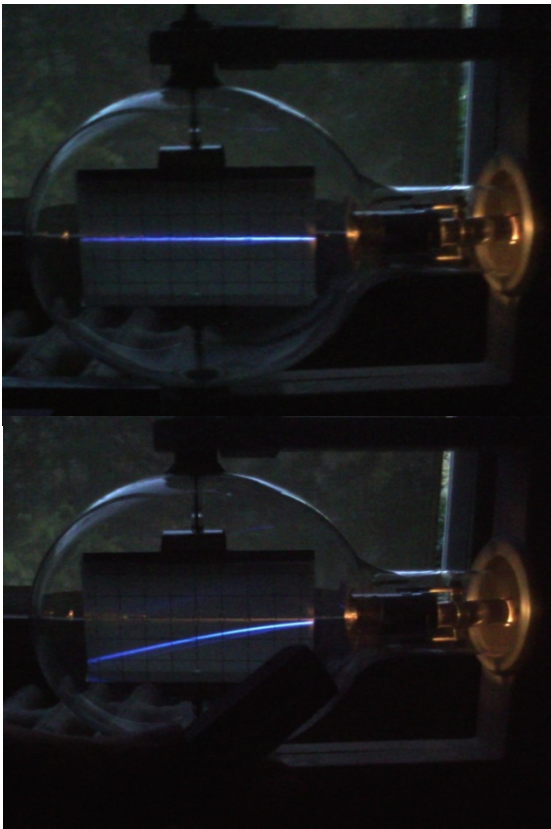


Expériences
Diverses

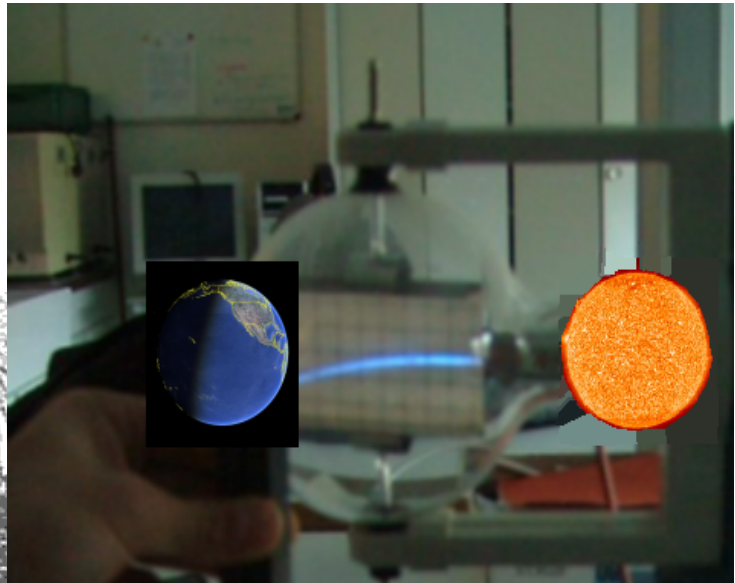
✚ **EXPERI
ENCE
N°1 :
MISE EN
EVIDEN**



CE DES LIGNES D'UN CHAMP MAGNETIQUE



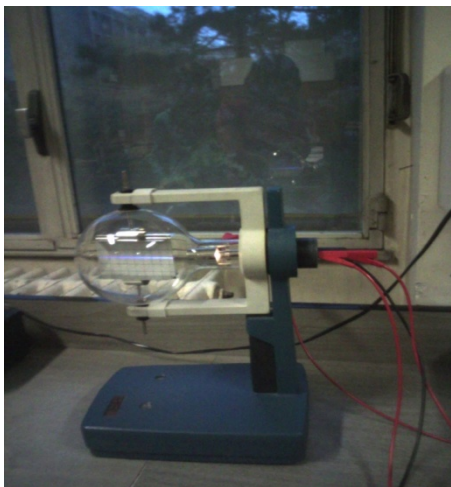
En disposant la limaille de fer sur la plaque, au dessus de l'aimant, les fines particules ferriques vont converger vers la source magnétique par les



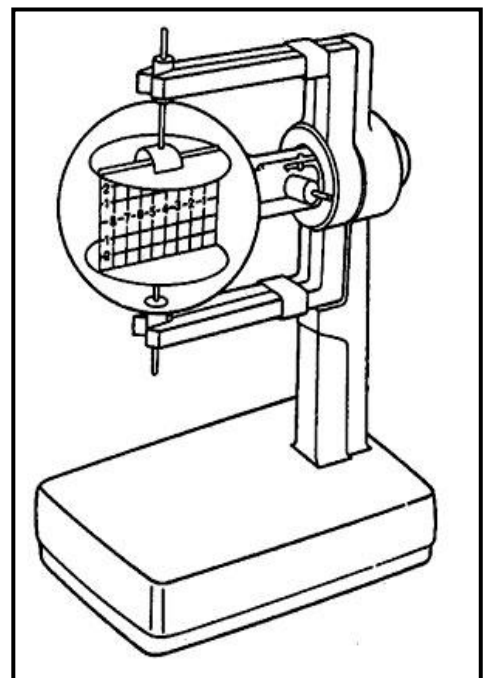
lignes du champ, ce qui nous permet de la visualiser.

✚ **EXPERIENCE N°2 : DEVIATION DE PARTICULES PAR UN CHAMP MAGNETIQUE**

Le générateur relié au tube permet d'envoyer un faisceau de particules (électroniques) dans l'atmosphère confinée du tube (reproduisant les conditions physiques d'avoir des aurores boréales). Le champ magnétique d'un aimant porté à proximité du dispositif parvient à dévier les particules. Ainsi donc, les particules se déplacent sur les lignes



observées sur l'expérience précédente. Quant aux aurores polaires, elles se produisent lorsque les particules solaires sont déviées par les lignes du champ magnétique terrestre et canalisées jusqu'aux zones polaires.



Dans cette configuration expérimentale nous pouvons assimiler le générateur au soleil et l'aimant au champ magnétique terrestre.

CONCLUSION



✦ Expérience 3 : SPECTRES DE FLAMMES COLOREES

Cette expérience consiste à mettre en évidence l'action des atomes et des différentes transitions sur la couleur des aurores.

En effet, en arrivant à une certaine vitesse, les protons et les électrons ont une énergie cinétique.

Lorsqu'ils arrivent dans l'atmosphère, leurs frottements avec les atomes présents dans le milieu produisent de la chaleur. Avec cette énergie thermique, les électrons des atomes présents dans l'atmosphère et la haute atmosphère vont subir une excitation : ils passent des niveaux stables à des niveaux instables (plus haut en énergie). En se désexcitant, les électrons retournent à leur niveau d'énergie stable et émettent un photon d'une longueur d'onde bien précise.

Dans l'expérience, un bec Bunsen produira de la chaleur par sa flamme et nous passerons successivement, au dessus de cette flamme des tiges en bois imbibées de sels métalliques (chlorure de sodium, de potassium ...). Nous pourrons alors observer des flammes de différentes couleurs (violet, jaune ...).

← *Flammes colorées, de gauche à droite : violet pâle (potassium), rose fuchsia (lithium), rouge (strontium), orangé (calcium), jaune (sodium).*

Rappel de la problématique :

Comment les expériences de laboratoire ont permis de confirmer les hypothèses des scientifiques sur la formation des aurores ?

de
les

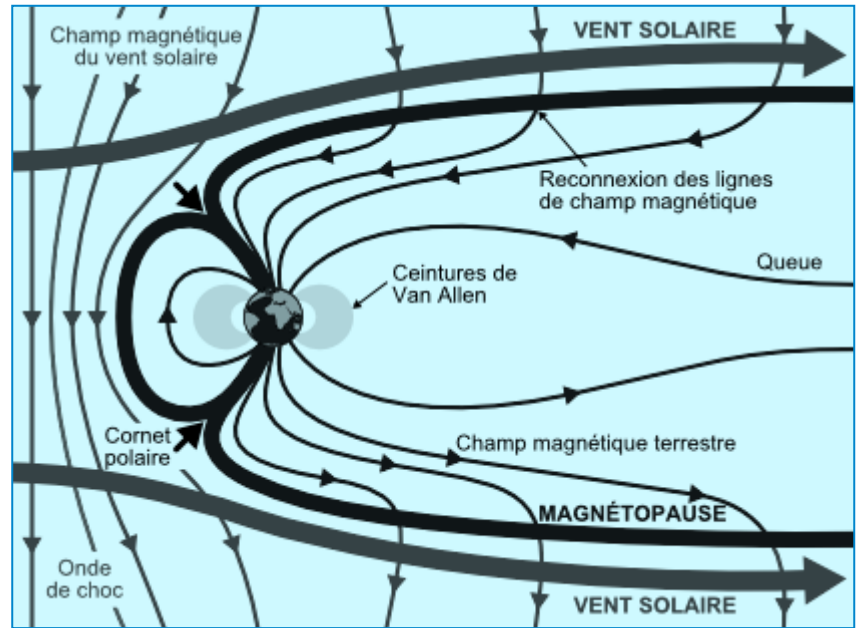


Réponse à la problématique :

Une aurore polaire est « un nuage gaz lumineux » dans l'atmosphère terrestre dû à l'excitation de ses atomes d'azote, d'hydrogène et d'oxygène entrés en collision avec particules solaires (éjectées lors d'une éruption solaire).

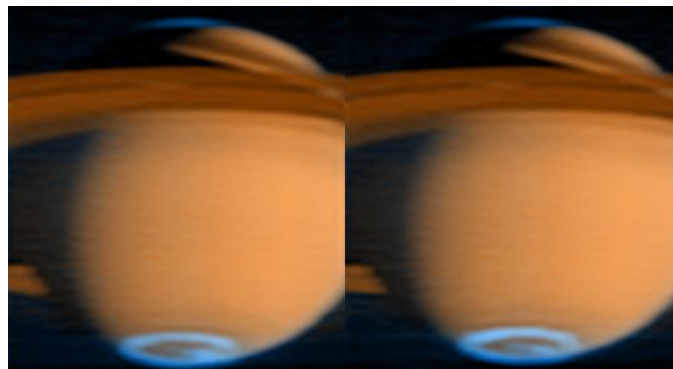
Plusieurs scientifiques ont étudié les phénomènes auroraux. Certains ont mis au point des dispositifs capables de reproduire ces phénomènes dans des conditions particulières.

Le champ Magnétique produit par une planète permet aux particules du vent solaire de remonter jusqu'aux pôles (au niveau des ovals auroraux) avant que ne se produisent les collisions engendrant les aurores. Mais le champ est avant tout un bouclier qui dévie une grande partie des particules solaires. On notera que tous les corps célestes possédant un champ magnétique donnent des phénomènes auroraux. Pour cette raison nous pouvons affirmer que les aurores polaires sont liées au champ magnétique terrestre.



Aurore sur saturne ↓

Source : <http://manmonster.centerblog.net/rub-aurores-polaires-et-explications.html>



Coupe structurale du champ magnétique terrestre (Magnétopause = Magnétosphère)

Source : <http://ocmartialarts.unixboxen.net/sciences-atmospheriques/vent-solaire-et-aurores-polaires.php>

← Le devenir du vent solaire après une éruption solaire

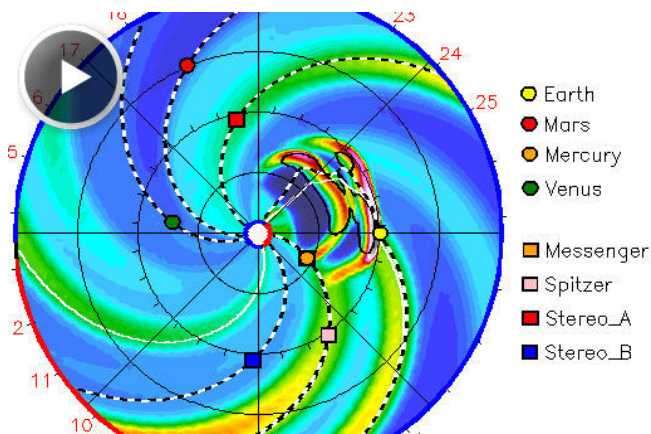


TABLEAU DES COULEURS ASSOCIEES AUX LONGUEURS D'ONDES DES TRANSITIONS ENERGETIQUES

<u>Couleurs Observées</u>	<u>Longueurs d'ondes λ</u> <u>(en nm)</u>	<u>Couleurs Complémentaires</u>
Violet extrême	400	
Violet moyen	420	Vert-jaune
Violet-bleu	440	
Bleu moyen	470	Jaune
Bleu-vert	500	
Vert moyen	530	Pourpre
Vert Jaune	560	
Jaune moyen	580	Bleu
Jaune-Orangé	590	
Orangé moyen	600	Bleu-verdâtre
Orangé-rouge	610	
Rouge moyen	650	Vert-bleu
Rouge extrême	780	

✚ *Atlas géographique de l'espace, sous la*

direction de Fernand Verger- Belin

- ✦ *L.Gouguenheim- Methode de l'astrophysique : Comment connaitre et comprendre l'Univers ? Editions Hachette*
- ✦ *Encyclopédie Microsoft Encarta 2011*
- ✦ *<http://www.universcience.vod.fr/media/651/satellite---aurores-boreales.html>*
- ✦ *mp01.free.fr/soleil/windsol.htm*

Une grande partie des connaissances restituées dans ce dossier sont des comptes rendus de visites que nous avons faites auprès du professeur Lilenstein.

Remerciements particuliers pour la disponibilité et les explications du professeur Jean Lilensten, planétologue à l'université Joseph Fourier de Grenoble.

Ainsi qu'aux organisateurs du Salon EXPERIMENTA de Minatec

REMERCIEMENTS

A madame Pépin et à monsieur Bayarri, professeurs au lycée les Eaux Claires et aux assistantes de physique

