

# T.I.P.E.

*Sujet : Les Aurores Polaires*

## **Sommaire :**

### Introduction

- I) Présentation du phénomène
- II) Les particules chargées : du vent solaire à la haute atmosphère terrestre
- III) Réalisation expérimentale

### Conclusion et Remerciements

### Annexe 1 : Photos d'aurores polaires

### Annexe 2 : Mouvement d'une particule chargée dans un champ $(\vec{E}, \vec{B})$

### Bibliographie

## **Introduction**

La découverte, par hasard, du site du simulateur d'aurore polaire du chercheur Jean Lilensten (chercheur à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – IPAG) m'a poussé à m'intéresser de plus près à ces phénomènes mystérieux que sont les aurores polaires et à chercher à en apprendre plus sur le mécanisme de ces phénomènes.

Observer de mes yeux l'expérience du chercheur n'a fait que renforcer ma motivation pour investir le sujet et pour essayer de reproduire son expérience par moi-même.

Je vais donc d'abord vous exposer brièvement le phénomène, puis développer en m'intéressant au moteur des aurores, puis je vous montrerai l'expérience du chercheur et la nôtre.

## I) Présentation du phénomène :

Les aurores boréales sont des phénomènes lumineux observables à haute latitude (entre 65 et 75°) qui sont causés par la désexcitation des molécules et atomes de la haute atmosphère terrestre (environ entre 80 et 500 km d'altitude par rapport à la surface de la Terre).

Ces atomes et molécules ont été préalablement excités par des particules chargées provenant du vent solaire (ensemble des particules éjectées par le soleil, majoritairement des électrons et des ions).

Le soleil est donc responsable de nos aurores polaires : lorsqu'il a une activité très importante, les aurores peuvent être observables à plus basse latitude (exemple : des aurores ont été aperçues Paris en 2000 et d'autres à Hawaï en 1859).

Vu de l'espace, ces aurores forment deux cercles centrés sur chacun des pôles magnétiques : ce sont les ovales auroraux. Celui des aurores boréales est au Nord et celui des aurores australes au sud.

Les couleurs des aurores boréales dépendent de la molécule ou de l'atome qui est désexcité en vertu de la loi  $\Delta E = h\nu$  où  $\Delta E$  est la variation de niveau d'énergie électronique,  $h$  la constante de Planck et  $\nu$  la longueur d'onde du photon émis.

En fait d'autres phénomènes de désexcitation que la variation de niveau d'énergie entrent en jeu mais dans les grandes lignes on a :

- De 80 à 100 km d'altitude, on observe du bleu et du rouge dus à l'azote
- De 100 à 250 km d'altitude, on observe du vert (c'est souvent la seule qu'on voit) dû à l'oxygène
- Au-dessus de 250km, l'émission rouge de l'oxygène prédomine.

Cf. **annexe 1** pour les photos d'aurores polaires.

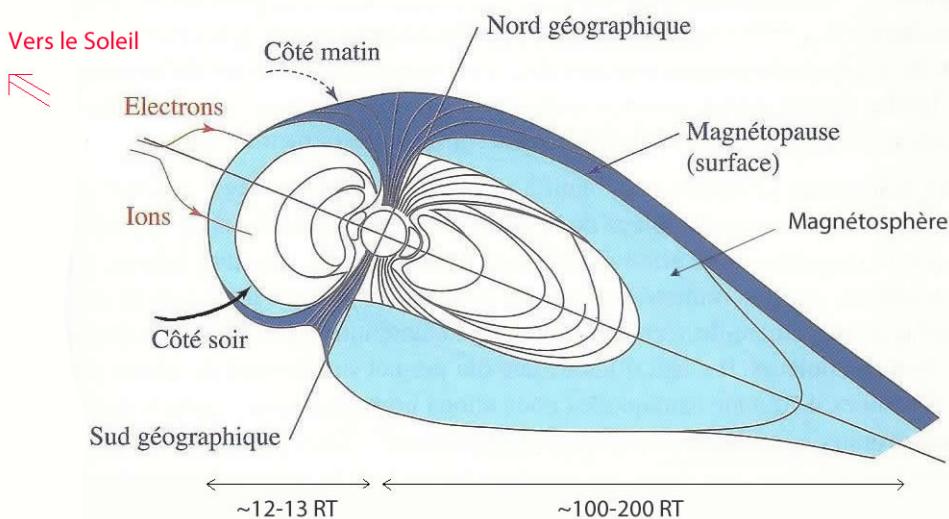
Intéressons-nous ensuite au trajet de ces particules chargées du vent solaire à la haute atmosphère terrestre.

## II) Les particules chargées : du vent solaire à la haute atmosphère terrestre

Le premier obstacle auquel se heurte une particule du vent solaire arrivant sur la Terre à 370 km/s en moyenne est la magnétosphère terrestre.

La magnétosphère terrestre est la zone où le champ magnétique terrestre et prédominant sur le champ magnétique propre au vent solaire. Sans le vent solaire, elle aurait une forme sphérique mais avec, elle a la forme d'une comète, la partie jour la plus proche est à environ 12 rayons terrestres et la partie nuit la plus lointaine à 100-200 rayons terrestres.

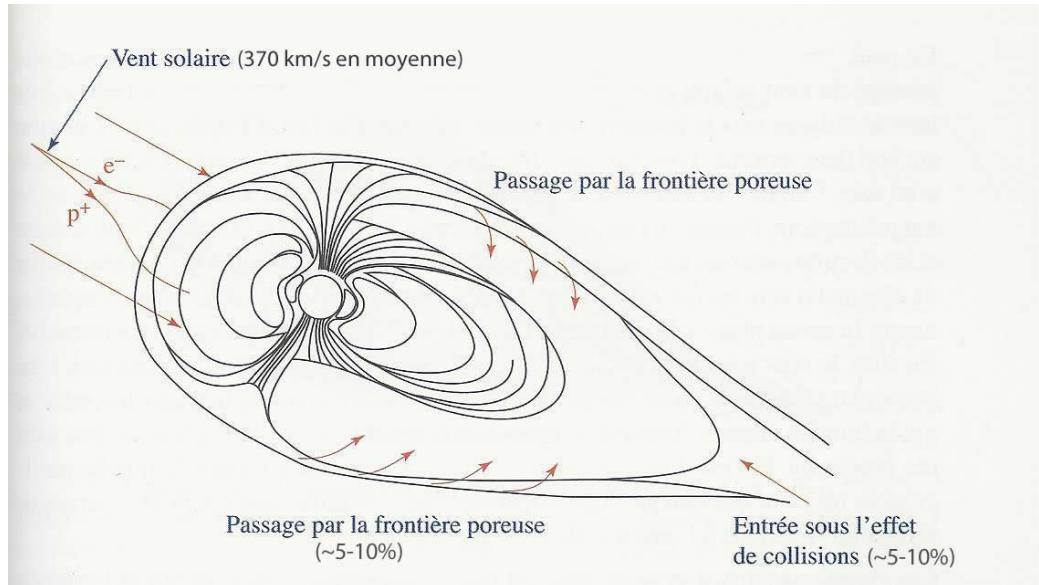
En arrivant sur la magnétosphère, les particules sont soumises au champ magnétique terrestre qui courbe leurs trajectoires : les électrons sont déviés côté matin et les protons ( $H^+$ ) côté soir.



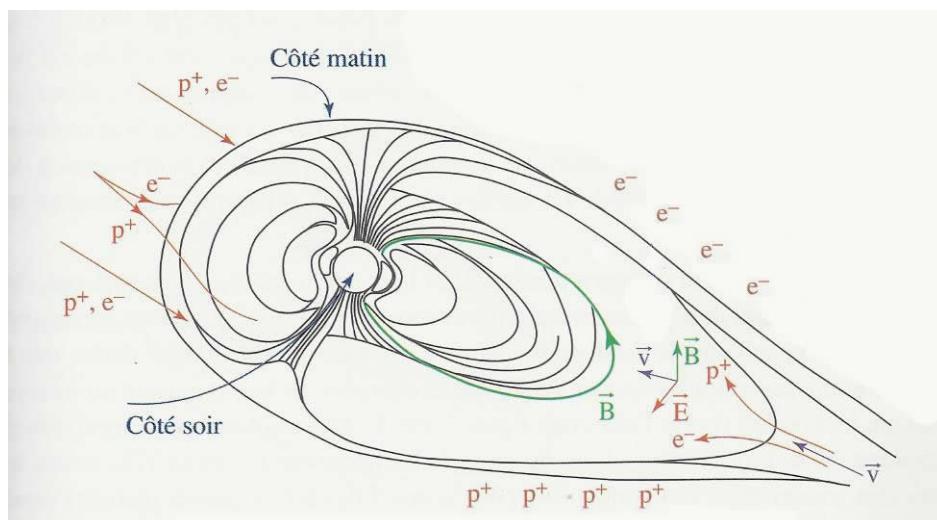
Les particules chargées contournent donc la Terre. Là, la magnétosphère est plus poreuse et, par un phénomène encore mal compris, 5 à 10% des particules pénètrent à l'intérieur de la magnétosphère.

Au niveau de la queue de la magnétosphère se trouve une zone de collision où, au gré des chocs, des électrons et des protons arrivent à pénétrer dans la magnétosphère

terrestre.

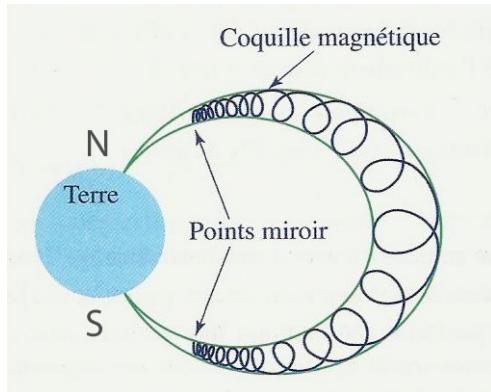


La présence en masse d'électrons coté matin va attirer les protons entrés dans la magnétosphère coté matin et la présence en masse de protons coté soir va attirer les électrons cotés soir. Cela va donc créer un champ  $\vec{E}$ . Associé au champ  $\vec{B}$  et à leur vitesse initiale, on voit que les particules vont avoir le mouvement décrit dans l'**annexe 2** et que la vitesse du centre guide (dont l'accélération est nulle) ne dépend pas de la particule considérée :  $\vec{V}_c = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{B^2}$  (voir les calculs dans l'**annexe 2**).



Les particules se rapprochent donc de la Terre jusqu'à ce que le champ  $\vec{B}$  soit tellement intense qu'il courbe de nouveau leur trajectoire, les électrons allant côté soir et les protons côté matin. Cela forme donc un anneau de courant autour de la Terre.

Au gré des collisions, les particules sont éjectées vers les pôles dans des coquilles magnétiques où elles vont avoir un mouvement de giration autour de la ligne de champ et un mouvement d'oscillation entre les points miroirs.



Le mouvement de giration provient directement de la résolution de la même équation que dans l'**annexe 2** sans le champ  $\vec{E}$ .

Le mouvement d'oscillation s'explique par le fait que le flux du champ  $\vec{B}$  à travers le circuit formé par la particule tournant autour de la ligne de champ  $\vec{B}$  est constant sur toute la ligne de champ d'après l'équation de Maxwell-flux ( $\text{div } \vec{B} = 0$ ).

En effet, ce flux vaut :  $\Phi = B * \pi * r^2$  où  $r$  est le rayon de Larmor (ou rayon du circuit décrit par la giration de l'électron autour de la ligne de champ).

Comme on a  $r = \frac{m * V_{perp}}{q * B}$  (**annexe 2**), il en découle que  $\frac{\pi * m^2 * V_{perp}^2}{q^2 * B} = \text{constante}$ .

D'où  $\frac{V_{perp}^2}{B} = \text{constante}$ .

Donc plus la particule chargée se rapproche des pôles, plus  $\vec{B}$  augmente, plus  $V_{perp}$  augmente.

Par la conservation de l'énergie, et donc de la norme de  $\vec{V}$ , on a donc  $V_{\text{parall}}$  qui diminue.

$V_{\text{parallel}}$  diminue donc jusqu'à s'annuler et le moindre choc renvoie la particule dans l'autre sens.

La position des points miroirs dépend de l'angle  $\alpha$  que fait  $\vec{V}$  avec  $\vec{B}$  (appelé angle d'attaque) tel que  $V_{\text{perp}} = V * \sin \alpha$ .

D'après ce qui précède on a :  $\frac{(V_{\text{perp}})^2 \text{ miroir}}{B_{\text{miroir}}} = \frac{(V_{\text{perp}})^2 \text{ équateur}}{B_{\text{équateur}}} = \text{constante}$

D'où,  $\frac{\sin^2 \alpha_m}{B_m} = \frac{\sin^2 \alpha_e}{B_e} = cst$

Donc seules les particules ayant un  $\alpha_e$  très faible sont susceptibles de pénétrer profondément dans l'atmosphère terrestre. Ce sont ces particules qui vont exciter les molécules et atomes de la haute atmosphère terrestre en leur transférant une partie de leur énergie (cinétique) par collisions. Ce sont donc elles qui sont responsables des aurores polaires.

Maintenant que nous avons mieux compris le processus de création des aurores, essayons de reproduire l'expérience du chercheur Jean Lilensten, et de Birkeland avant lui. C'est-à-dire essayons de produire des aurores polaires en laboratoire.

### **III) Réalisation expérimentale :**

L'expérience du chercheur :

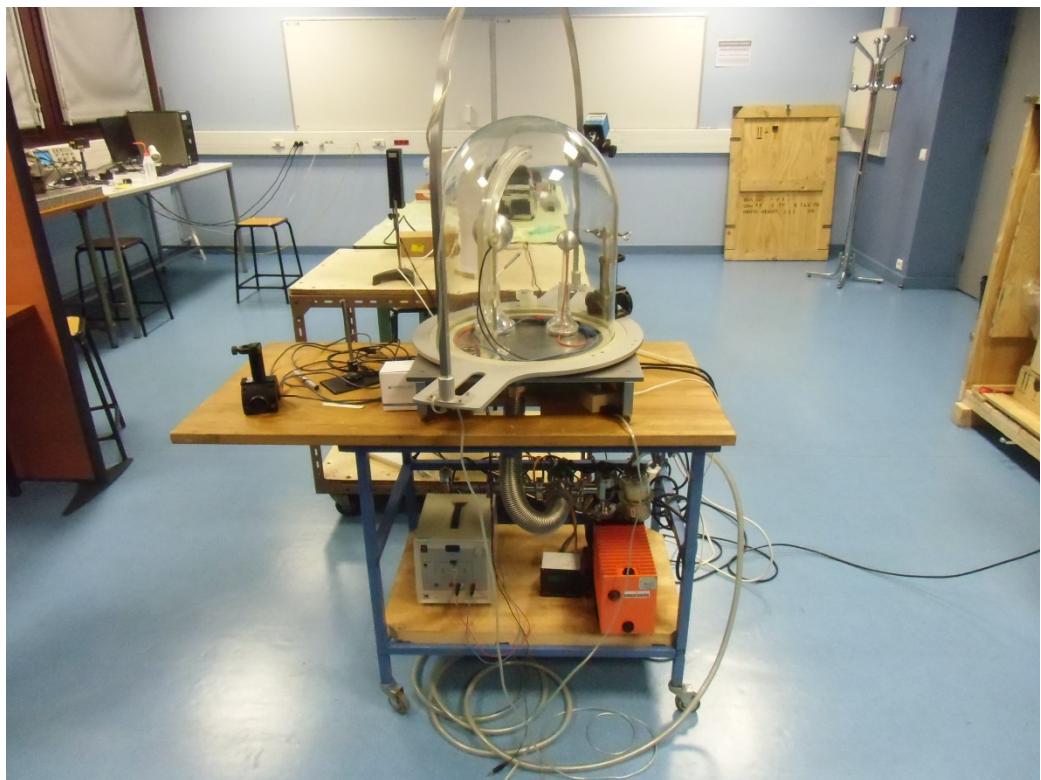
Vide : 10 Pa

Tension : 500 V

Dimensions de l'enceinte : base : disque de rayon 40 cm

Champs magnétiques : 1 aimant de 400 mT et un de 800 mT

Le chercheur Jean Lilensten a cherché à illustrer le mécanisme de production d'aurore polaire en reproduisant l'expérience faite 100 ans plus tôt par Birkeland. Voici une photo de son montage :



Le principe est simple sur le papier : il suffit de d'imposer entre une électrode sphérique munie en son centre d'un puissant aimant (qui représente la Terre et son champ magnétique) et une buse (qui représente de soleil) une différence de potentiel supérieure à 500V (envoi d'électrons). Voici ce que l'on observer lorsqu le chercheur nous a fait sa démonstration :



Le bleu-violet est dû à la présence majoritaire d'azote et non d'oxygène (vert).

Impressionnés par ce résultat, nous avons décidé de fabriquer notre propre simulateur d'aurore :

Notre expérience :

Vide : environ 100 Pa

Tension : variable, entre 0 et 6 kV

Dimensions : base : disque de rayon 22 cm

Hauteur : 20 cm

Champs magnétiques : 1T

Voici notre montage :



On s'est bien vite rendu compte que ce n'était pas aussi simple que l'on pensait de prime abord. Après bien des difficultés (problèmes pour faire le vide, le générateur haute tension qui nous a lâché, difficultés pour trouver les sphères), on a quand même, finalement, réussi à avoir des aurores ! Voici la photo de l'une d'entre elles :



## **Conclusion et remerciements :**

Ce TIPE m'a permis de développer mon esprit d'initiative, ma curiosité et m'a fait apercevoir l'étendu des difficultés que l'on rencontre lorsque l'on doit mettre la théorie en pratique.

Je voudrais remercier chaleureusement le chercheur Jean Lilensten qui a gracieusement offert de son temps pour nous montrer son expérience, pour répondre à certaines de nos questions et pour nous faire profiter de son expérience de technicien pour résoudre certain problèmes expérimentaux que nous avons pu rencontrer (par exemple quelle colle résiste le mieux au vide !).

## Annexe 1 : Photos d'aurores polaires



Prise sur l'Alaska, en 2012, par le photographe Carl Johnson



Prise en Seine et Marne, dans la nuit du 6 au 7 avril 2000, par le Club de Gretz



Prise par Cyril Simon, en Alaska



Prise à 400 kilomètres d'altitude, depuis la Station spatiale internationale, le 15 juin 2012, par l'astronaute américain Joe Acaba. Au premier plan apparaît le bras manipulateur Canadarm2

## Annexe 2 : Mouvement d'une particule chargée dans un champ $(\vec{E}, \vec{B})$

Plaçons nous dans un référentiel galiléen et étudions une particule P chargée, de masse  $m$  et de charge  $q$  en coordonnées cartésiennes.

P est soumise à la force de Lorentz et à son poids que l'on va négliger par rapport à la force de Lorentz

P vérifie, d'après le principe fondamental de la dynamique :  $m\vec{a} = q(\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B})$

On suppose que les axes sont pris tels que l'axe des  $y$  est colinéaire à  $\vec{E}$  et celui des  $z$  à  $\vec{B}$ .

En projetant sur l'axe des  $x$  et l'axe des  $y$ , on a :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = q\dot{y}B \\ m\ddot{y} = q(E - \dot{x}B) \\ m\ddot{z} = 0 \end{cases}$$

En posant :  $\dot{u} = \dot{x} + i\dot{y}$ , où  $i^2 = -1$

On déduit des équations précédentes :  $m\ddot{u} = -qiB\dot{u} + iqE$

D'où, avec pour condition initiale une vitesse  $\vec{V}_0$  quelconque (et l'origine du repère correspond à la position de la particule à l'origine des temps), on a :

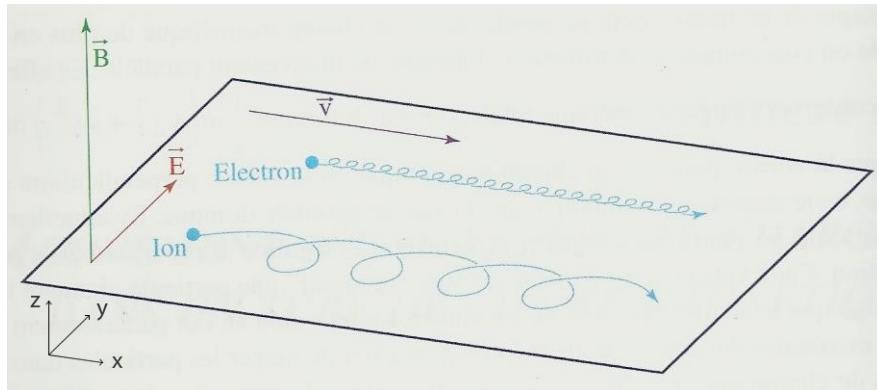
$$\dot{u}(t) = \left[ \left( V_{0x} - \frac{E}{B} \right) + iV_{0y} \right] * e^{-i\omega t} + \frac{E}{B} \quad \text{où } \omega = \frac{qB}{m}$$

$$\text{Donc, } u(t) = \left( \frac{m}{qB} \right) * \left[ -i \left( V_{0x} - \frac{E}{B} \right) + V_{0y} \right] * (1 - e^{-i\omega t}) + \frac{E}{B} * t$$

$$\text{D'où : } \begin{cases} x(t) = \frac{m}{qB} * \left[ \left( V_{0x} - \frac{E}{B} \right) \sin(\omega t) + V_{0y} * (1 - \cos(\omega t)) \right] + \frac{E}{B} * t \\ y(t) = \frac{m}{qB} * \left[ \left( V_{0x} - \frac{E}{B} \right) (\cos(\omega t) - 1) + V_{0y} * \sin(\omega t) \right] \\ z(t) = V_{0z} * t \end{cases}$$

On obtient alors plusieurs choses : premièrement, lorsque la particule n'a pas de vitesse initiale sur l'axe des  $z$  (c'est-à-dire  $V_{0z} = 0$ ), le mouvement de la particule est

décrit ci-dessous :



On a donc dans ce cas la vitesse du centre guide :  $\vec{V}_c = \langle \vec{V} \rangle = \frac{E}{B} \vec{e}_x = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{B^2}$

Deuxièmement, on voit que sans le champ  $\vec{E}$ , le mouvement de la particule est hélicoïdal d'axe de rotation parallèle à l'axe des z et de rayon (rayon de Larmor)  $r = \frac{m}{qB} * V_{perp}$ , où  $\vec{V}_{perp}$  est la projection de  $\vec{V}$  sur le plan Oxy .

( $\vec{V}$  est constante en norme car il n'y a pas de champ  $\vec{E}$  seulement le champ  $\vec{B}$  qui n'accélère pas les particules).

$\vec{V}_{parallel}$  est donc la composante de vitesse  $\vec{V}$  sur l'axe des z.

## **Bibliographie :**

### Livres :

Lilensten J., Bornarel J., Sous les feux du Soleil : vers une météorologie de l'espace, EDP Sciences, **2001**

Lilensten J., Blelly P.L., Du Soleil à la Terre, EDP Sciences, **2000**

Kockarts G., Aéronomie, physique et chimie de l'atmosphère, De Boeck Université, **2000**

Pierrard V., L'environnement spatial de la Terre, UCL-Presses universitaires de Louvain, **2009**

### Internet :

<http://planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/>

<http://fr.wikipedia.org/>

### Conférence :

Les aurores polaires sur Terre et sur les autres planètes par Mathieu Barthélémy, enseignant-chercheur à l'IPAG, le mardi 26 novembre 2013.