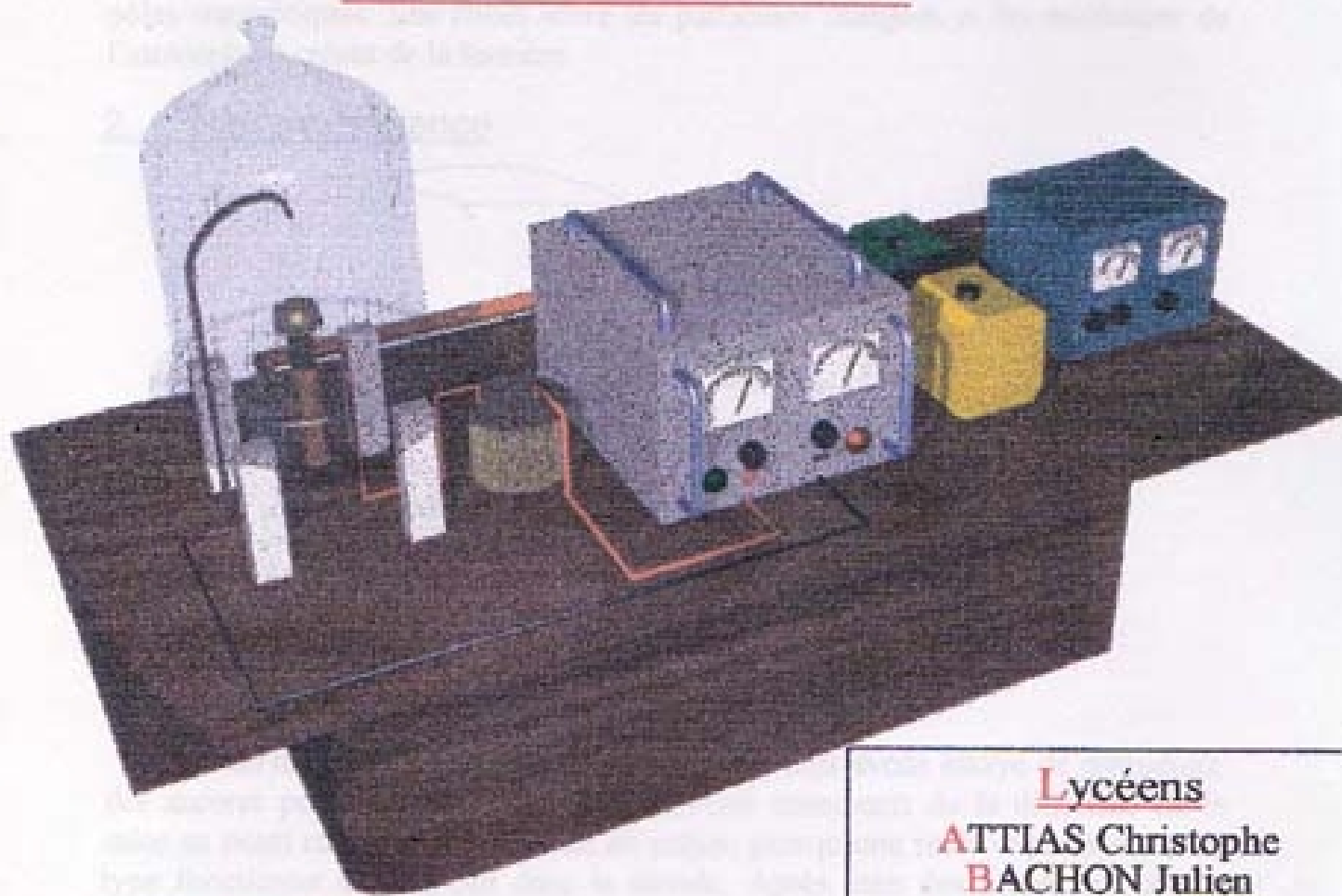


# Simulation d'Aurores Polaires

## Au Lycée Pierre Brossolette

### A Villeurbanne



#### Lycéens

**ATTIAS** Christophe  
**BACHON** Julien  
**EYRAUD** Lionel  
**FONTERET** Eugénie  
**KREFA** Abir  
**LE BLEVENEC** Sébastien  
**MUÑOZ** Antonio

#### Professeurs

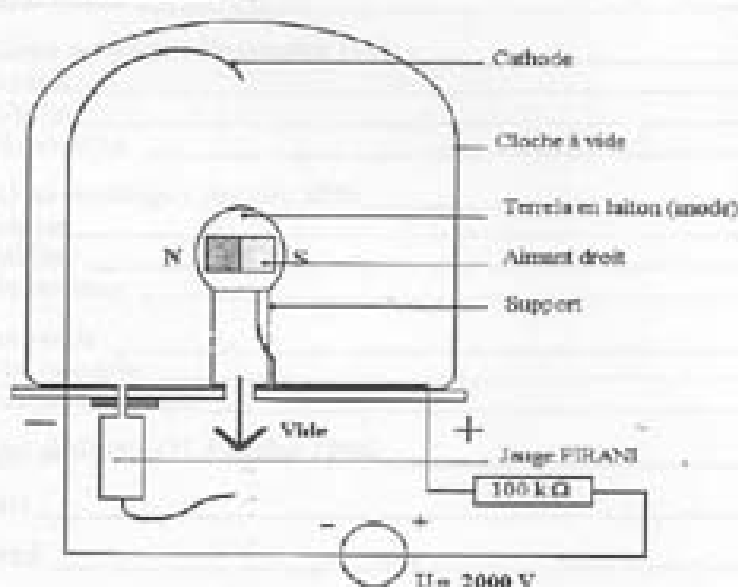
M. **JEANJACQUOT**  
Mme **PIGEON**  
Chercheur C.N.R.S.  
**M. CHAMBON**

# Simulation d'aurores polaires

## 1. Les aurores polaires

Il y a exactement un siècle, Birkeland attribua le phénomène des aurores polaires à des jets de particules chargées émises par le Soleil. C'est lui qui, pour prouver sa théorie, a procédé aux premières expériences de laboratoire reproduisant des aurores polaires sous forme d'anneaux de façon artificielle. Depuis le début des années soixante, les informations recueillies grâce aux satellites artificiels ont permis de bâtir un nouveau modèle physique de l'aurore polaire : La magnétosphère joue le rôle d'un immense tube cathodique qui focalise les faisceaux d'électrons et de protons vers la Terre, au voisinage des pôles magnétiques. Les chocs entre les particules chargées et les molécules de l'atmosphère créent de la lumière.

## 2. Notre expérience



**Schéma de notre expérience**

Tout au long de l'année scolaire précédente, nous avons essayé de reproduire des aurores polaires artificielles, tout en étant conscients de la difficulté de la mise au point et de l'ambition d'un tel projet, puisqu'une seule expérience de ce type fonctionne aujourd'hui dans le monde. Après bien des problèmes et des essais successifs, nous avons réussi à obtenir les superbes anneaux. Le protocole final consiste à créer un vide partiel dans une cloche en verre à l'intérieur de laquelle une sphère en laiton renfermant un aimant représente la Terre. Celle-ci est placée à l'anode et le champ magnétique dévie les électrons provenant de la cathode. L'excitation des molécules de gaz par les électrons crée de la lumière. A l'aide d'un monochromateur, nous avons enfin vérifié que le spectre émis par la décharge correspond bien au spectre émis par une aurore naturelle.

Le budget de la manipulation a été de 6800 Francs.

## Sommaire

<b>1. Introduction :</b>	<b>1</b>
1.1. Objectifs	1
1.2. Déroulement du projet	1
<b>2. Les aurores polaires</b>	<b>1</b>
2.1. Introduction	1
2.2. Qu'est-ce qu'une aurore polaire? Comment se forme-t-elle?	1
2.3. La théorie de Birkeland	1
2.4. Le trajet des électrons	2
<b>3. Déroulement des séances et évolution du montage</b>	<b>2</b>
3.1. Premier montage : Octobre 1995	2
3.1.1. Schéma	2
3.1.2. Matériel	2
3.1.3. Observations	3
3.2. Deuxième montage : Novembre 1995	3
3.2.1. Schéma	3
3.2.2. Principe	3
3.2.3. Observations	3
3.3. Troisième montage : Janvier 1996	3
3.3.1. Schéma	3
3.3.2. Principe	4
3.3.3. Observations	4
3.4. Autres essais	4
3.4.1. Pâte à modeler	4
3.4.2. Peinture métallique	4
<b>4. Montage définitif (21 Février 1996)</b>	<b>5</b>
4.1. Schéma	5
4.2. Matériel	5
4.3. Mise en route : protocole expérimental	6
4.4. Observations	6
<b>5. Calculs</b>	<b>6</b>
5.1. Calcul de la valeur de la résistance nécessaire	6
5.2. Utilisation des courbes de Paschen (1889)	7
5.2.1. But	7
5.2.2. Hypothèses	7
5.2.3. Calculs	8
5.3. Comment reproduire un champ magnétique dont le spectre est le même que celui de la Terre	8
5.4. Calcul du champ magnétique nécessaire pour obtenir les anneaux	11
5.4.1. Bilan des forces s'exerçant sur l'électron	11
5.4.2. On projette sur un axe parallèle à $F_n$	11
5.4.3. Application numérique	12
5.4.4. Les limitations de ce calcul sont claires	13
<b>6. Comparaison entre le spectre de la décharge et celui des aurores</b>	<b>13</b>
6.1. Obtention du spectre	13

6.2. Résultats	13
6.3. Interprétation	14
7. Face aux nombreux problèmes rencontrés, les solutions trouvées	14
7.1. Le vide	14
7.2. Les fuites	14
7.2.1. Fuites d'air	14
7.2.2. Fuites électriques	14
7.3. La tension	14
7.4. L'aimant	14
7.5. La résistance	15
7.6. La pompe	15
7.7. Importance de la position de la Terrula par rapport à la cathode	15
7.8. Conclusion	15
8. Conclusion et perspectives	16

#### Annexes :

Doc. 1 : Trajet des particules du vent solaire.

Doc. 2 : Spectres et mesures des longueurs d'onde

## 1. Introduction :

### *1.1. Objectifs*

Durant l'année scolaire précédente, nous avons consacré nos mercredis après-midi à étudier un phénomène physique spectaculaire et de grande beauté : celui des aurores polaires, et ceci en vue d'atteindre les 2 objectifs suivants :

- D'abord, obtenir des aurores polaires artificielles en s'inspirant de l'une des premières expériences de Kristian Birkeland.
- Utiliser ensuite l'expérience pour mieux comprendre les propriétés physiques liées à ce phénomène.

### *1.2. Déroulement du projet*

C'est un simple document trouvé dans un livre de sciences de Terminale qui fut à l'origine du projet. Nous avons peu à peu rassemblé une documentation importante qui nous a permis de comprendre le mécanisme des aurores polaires. Enfin, enseignants et chercheurs nous ont aidés à réaliser notre expérience.

## 2. Les aurores polaires

### *2.1. Introduction*

Il est presque impossible de décrire ou de fixer par une photographie la très grande beauté d'une aurore enflammant le ciel. Comme ce phénomène ne s'observe que très rarement au-dessus des régions habitées, on manqua pendant longtemps d'hypothèses satisfaisantes pour en expliquer le mécanisme.

### *2.2. Qu'est-ce qu'une aurore polaire? Comment se forme-t-elle?*

L'aurore polaire est une luminescence provoquée par l'interaction entre :

- d'une part, les atomes ou molécules de la haute atmosphère;
- d'autre part, les particules de haute énergie (jusqu'à plusieurs dizaines de keV) qui, venant de l'espace, pénètrent dans l'atmosphère.

Ces particules formant le vent solaire (électrons et protons) sont guidées par les lignes du champ magnétique terrestre.

Les atomes et les molécules de l'atmosphère sont principalement des atomes et des molécules d'oxygène et d'azote ( $N_2$ , O,  $O_2$ ,  $N_2^+$ , et H au-dessus de 700km). Lorsqu'ils sont heurtés par des particules chargées, ils perdent un ou plusieurs électrons (ionisation) ou bien ils sont portés à un état d'énergie supérieure (excitation). Quand ils reviennent à leur état initial, soit en capturant de nouveaux électrons, soit en perdant de l'énergie, ils émettent un rayonnement de longueur d'onde déterminée.

### *2.3. La théorie de Birkeland*

C'est pour prouver sa théorie sur les aurores boréales que Kristian BIRKELAND monta son expérience en 1896. Selon lui, les aurores boréales sont dues à la collision entre les particules venant directement du Soleil (le vent solaire : électrons et protons) et les molécules de l'atmosphère. Mais on sait aujourd'hui (depuis les années 60) que ces

particules contournent la magnétosphère avant de revenir du plasma vers les zones aurorales.

#### 2.4. Le trajet des électrons

Le Soleil envoie des particules (protons et électrons principalement) qui forment le vent solaire (doc. 1). Celui-ci rencontre la magnétosphère et la contourne. Les particules se regroupent à plusieurs dizaines de rayons terrestres, côté nuit, en une zone encore mal connue dite de reconnexion. Une partie de ces particules est alors renvoyée vers la Terre, traversant une zone appelée "feuillet de plasma". Dans ce retour vers la Terre, elles sont puissamment accélérées, par des mécanismes encore mal compris, et passent de quelques dizaines d'eV à des énergies pouvant atteindre plusieurs dizaines (voire centaines!) de keV. Elles entrent alors en contact avec l'atmosphère au niveau des ovales auroraux et excitent les molécules de cette atmosphère. Il se forme ainsi des aurores dont l'apparence dépend de la quantité de particules émises depuis le plasma : elles peuvent prendre la forme de nuages ou de draperies plus ou moins complexes.

### 3. Déroulement des séances et évolution du montage

#### 3.1. Premier montage : Octobre 1995

##### 3.1.1. Schéma

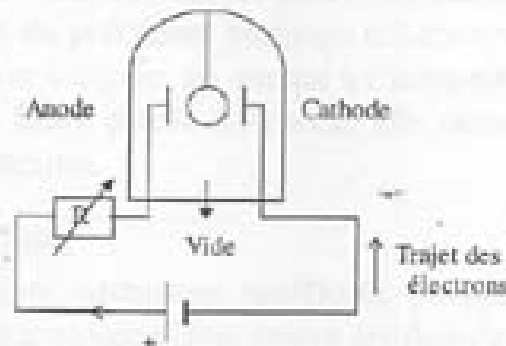


Figure 1 : schéma du premier montage

##### 3.1.2. Matériel

Une cloche en verre transparente.

Une simple "boule de Kinder" représentant la Terre ; à l'intérieur, on place un aimant en ferrite.

Une pompe qui sert à faire le vide dans la cloche.

Au pôle +, on relie un disque de cuivre : c'est l'anode.

Au pôle -, on relie un disque de cuivre : c'est la cathode.

La boule est suspendue à un fil de Nylon, maintenu en haut de la cloche par un bouchon de caoutchouc, entre l'anode et la cathode.

Un générateur de tension délivre une tension de 5kV sous une intensité de 2mA.

Un rhéostat de valeur 100k $\Omega$  sert de résistance.

### 3.1.3. Observations

On obtient uniquement une décharge allant de la cathode vers l'anode et contournant la Terrela : on n'observe aucun anneau sur cette dernière

## 3.2. Deuxième montage : Novembre 1995

### 3.2.1. Schéma

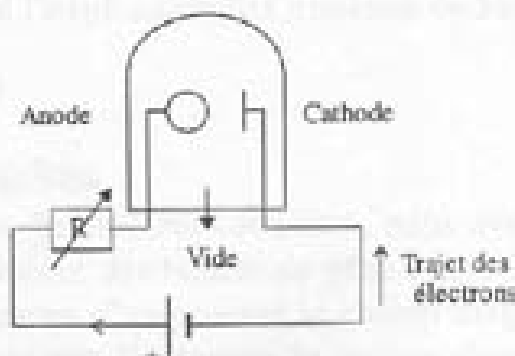


Figure 2 : schéma du deuxième montage

### 3.2.2. Principe

Après le voyage du professeur à Tromsø et son entretien avec Terge Brundland, un spécialiste des aurores boréales, la Terrela est placée à l'anode.

Le matériel utilisé lors du précédent montage est conservé, mais c'est une "boule de Noël" qui sert de Terrela, avec toujours un aimant à l'intérieur. On obtient un champ de 35mT à la surface de la boule. Étant placée à l'anode, elle devait être conductrice, on l'a donc recouverte de papier aluminium.

### 3.2.3. Observations

Les résultats sont alors nettement améliorés puisque l'on peut observer la formation d'un anneau de couleur violette (une aurore artificielle) sur la Terrela.

Il s'agit désormais d'affiner le montage afin d'obtenir les 2 anneaux.

## 3.3. Troisième montage : Janvier 1996

### 3.3.1. Schéma

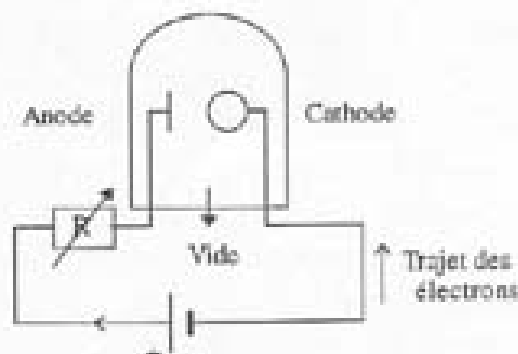


Figure 3 : schéma du troisième montage

### 3.3.2. Principe

Une "boule à thé" remplace ici la "boule de Noël". Contrairement à l'expérience précédente, on a relié la Terrela à la cathode.

### 3.3.3. Observations

On observe un anneau autour de l'équateur de la Terrela, et non deux anneaux autour des pôles. Birkeland, qui avait fait cette expérience d'inversion des pôles électriques, pensait avoir trouvé l'explication des anneaux de Saturne grâce à ce montage.

## 3.4. Autres essais

### 3.4.1. Pâte à modeler

Pour pouvoir observer de meilleurs anneaux, nous avons essayé de diminuer le diamètre de la Terrela en fabriquant des boules de pâte à modeler qui entouraient de très près l'aimant. Cela nous permettait d'augmenter le champ magnétique à la surface de la Terrela. Mais nous devions toujours l'entourer de papier aluminium et les boules ainsi confectionnées n'étaient pas parfaitement sphériques, ce qui nuisait à l'expérience.

### 3.4.2. Peinture métallique

Pour éviter les effets de pointe sur la Terrela dus au papier aluminium, nous avons essayé de vaporiser sur la Terrela une peinture que nous pensions métallique. L'ayant fait à proximité de la cloche, un résidu de cette peinture s'y est déposé et lors de l'expérience suivante (celle-ci n'ayant pas fonctionné, car la peinture n'était pas conductrice), nous avons observé une décharge de couleur bleue au lieu de la couleur violette habituelle. Nous doutant que cela venait de la peinture, nous avons tout de suite posé dans la cloche un coton imbibé de cette peinture et recommencé l'expérience. Nous avons alors pu observer une décharge bleue magnifique qui est due à l'un des composants volatils de la peinture.



## 4. Montage définitif (21 Février 1996)

### 4.1. Schéma

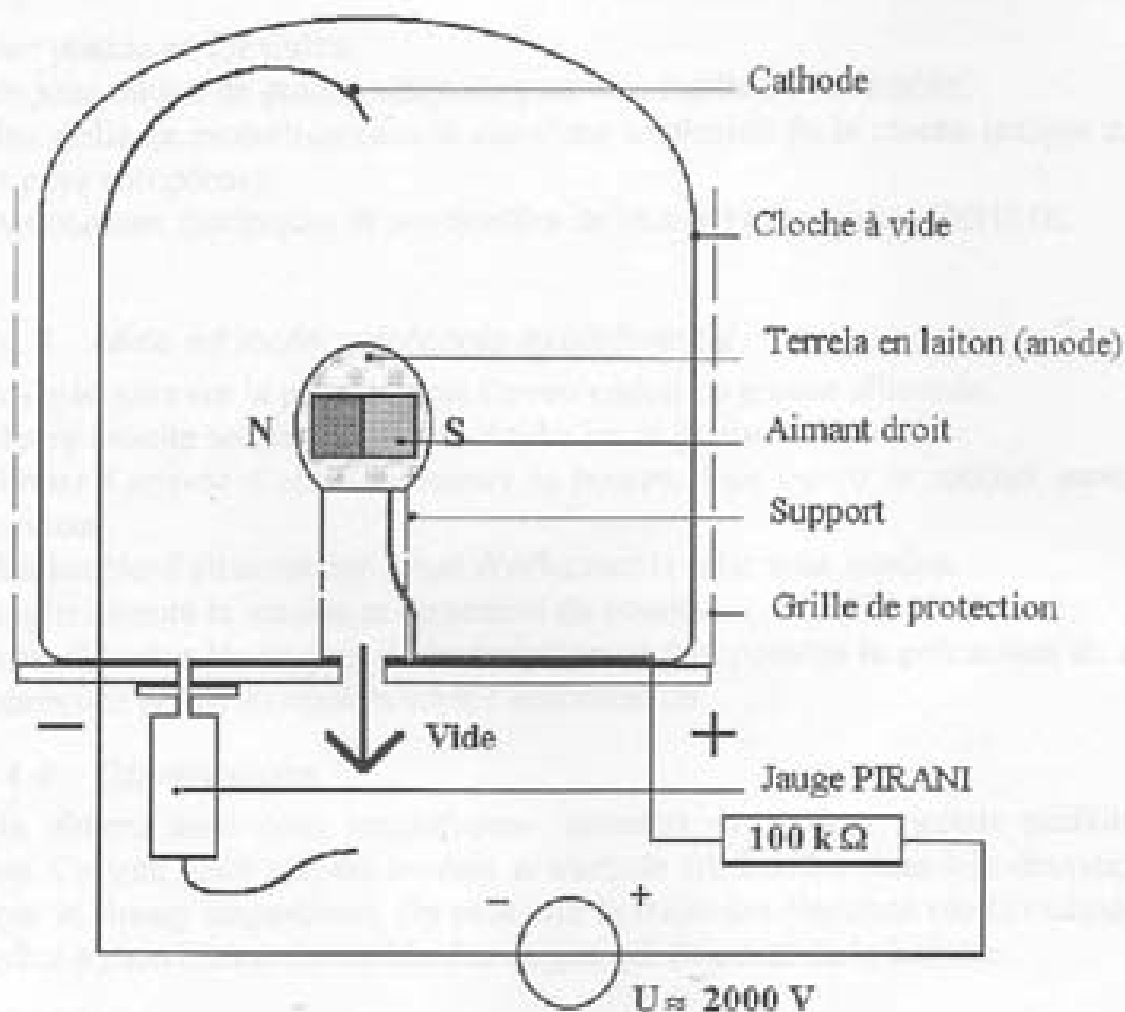


Figure 4 : schéma du montage actuel

### 4.2. Matériel

Une cloche en verre transparente.

Une pompe servant à faire un vide primaire dans la cloche.

Une alimentation pouvant fournir une tension jusqu'à 2000V. L'intensité du courant peut varier jusqu'à 20mA.

Une résistance de 100kΩ plongée dans un pot d'huile pour faciliter la dissipation de la chaleur qu'elle produit par effet Joule. On dispose de plusieurs pots d'huile pour pouvoir changer facilement de résistance.

Une jaugé Pirani servant à mesurer la pression à l'intérieur de la cloche.

Une tige en cuivre reliée au pôle négatif du générateur : c'est la cathode. Elle représente la zone dite de reconnexion d'où proviennent les électrons.

Une Terrela de diamètre 30mm. C'est une petite sphère en laiton représentant la Terre. Elle est placée à l'anode car elle doit absorber les électrons venant de la cathode.

Un aimant d'une rémanence de 1,1T placé à l'intérieur de la Terrela de telle manière que ses pôles soient équidistants de la cathode. L'intensité du champ magnétique est ainsi de 150mT aux pôles. Cet aimant représente l'intensité du champ magnétique terrestre.

Une platine en Plexiglas.

Un joint enduit de graisse siliconée pour une meilleure étanchéité.

Une grille de protection dans le cas d'une implosion de la cloche (exigée dans la plupart des pays européens).

Des cordons électriques et des douilles de sécurité aux normes CEI1010.

#### 4.3. Mise en route : protocole expérimental

Poser le joint sur la platine après l'avoir enduit de graisse siliconée.

Mettre ensuite soigneusement la cloche sur la platine.

Fermer l'arrivée d'air et actionner la pompe. Puis ouvrir le robinet servant de clapet anti-retour.

Préchauffer l'alimentation avant d'effectuer la mise sous tension.

Régler ensuite la tension et l'intensité du courant.

Afin d'écartier les risques d'électrocution, il faut prendre la précaution de mettre une main dans une poche en manoeuvrant l'alimentation.

#### 4.4. Observations

On obtient ainsi deux magnifiques anneaux de couleur violette parfaitement symétriques. Ce sont deux aurores boréale et australe artificielles dues à la déviation des électrons par le champ magnétique. On peut voir le trajet des électrons (de la cathode vers l'anode) grâce à l'excitation des molécules de gaz qui émettent de la lumière.

### 5. Calculs

#### 5.1. Calcul de la valeur de la résistance nécessaire

Notre alimentation ne pouvant débiter plus de  $I_{max}=20mA$  sous une tension de  $U=2000V$ , nous avons besoin de mettre une résistance en série dans notre circuit. Or, au moment de la décharge, la résistance entre les électrodes passe de l'infini à pratiquement zéro. On calcule donc la valeur de la résistance comme si elle était seule dans le circuit, grâce à la loi d'Ohm :

$$U_R = R \cdot I_{max}$$
$$\Rightarrow R = \frac{U_R}{I_{max}} = \frac{2000}{20 \cdot 10^{-3}} = \frac{2000}{20} \cdot 10^3 = 100 \cdot 10^3 \Omega$$

On obtient bien la valeur de  $100k\Omega$  précédemment citée.

## 5.2. Utilisation des courbes de Paschen (1889)

### 5.2.1. But

- Connaître le produit ( distance entre les électrodes  $d$  multipliée par la pression  $P_0$ ) pour avoir une décharge sachant que la tension maximale  $V_{\text{max}} = 2000 \text{ V}$ .
- Connaître la distance maximale entre les électrodes sachant que  $P_0 = 1 \text{ mbar}$ .

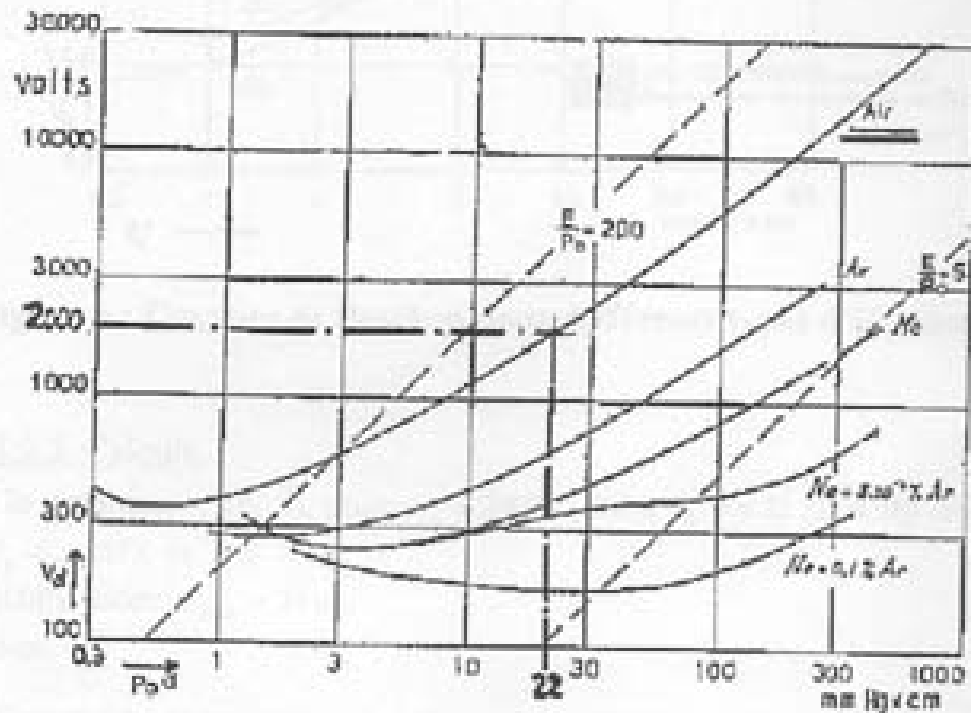


Figure 5 : Courbes de Paschen pour des électrodes en fer

### 5.2.2. Hypothèses

1 - Les électrodes sont en cuivre et en laiton. La tension disruptive  $V_d$  est considérée équivalente à celle que l'on obtient avec des électrodes en fer. Seules les électrodes en métaux alcalins et alcalino-terreux permettent de diminuer  $V_d$ , de plus à partir de  $V_d = 1000 \text{ V}$  toutes les courbes tendent vers une asymptote (fig. 6).

2 - Une des 2 électrodes n'est pas plane ( la Terrella est sphérique ). Les courbes de Paschen considèrent les 2 électrodes comme planes. Si elles ne sont pas planes, on peut augmenter la distance maximum entre les deux électrodes.

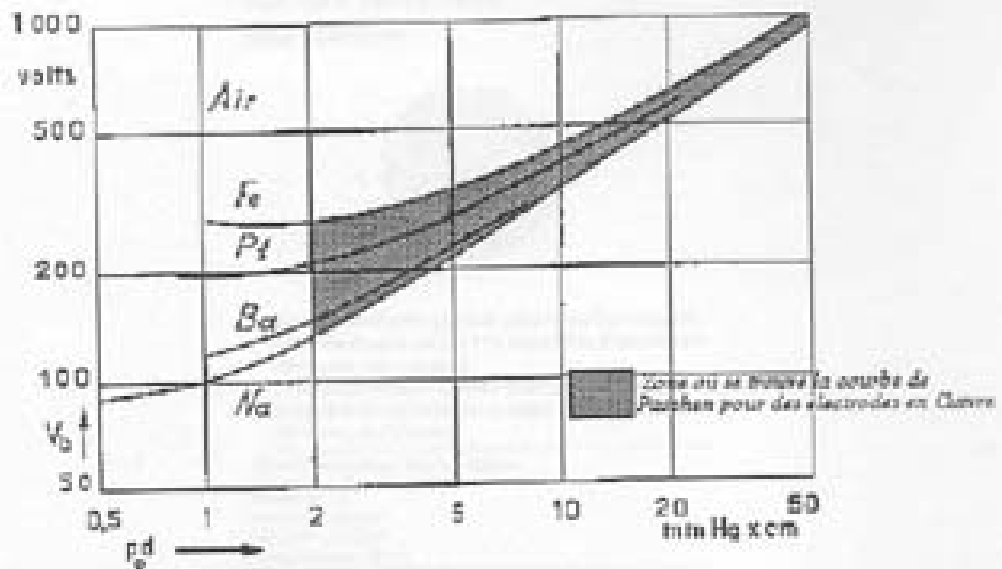


Figure 6 : Courbes de Paschen pour différents types d'électrodes

### 5.2.3. Calculs

D'après le graphique (fig. 5), pour  $V_0 = 2000V$ , on a  $P_0 \cdot d = 22 \text{ mm} \cdot \text{cm}$

Donc  $P_0 \cdot d = 29 \text{ Pa} \cdot \text{m}$

Or  $P_0 = 100 \text{ Pa}$ , donc  $d_{\text{max}} = 29 \text{ cm}$

Ici  $d = 15 \text{ cm}$ .

### 5.3. Comment reproduire un champ magnétique dont le spectre est le même que celui de la Terre

\* La Terre est assimilable à un dipôle magnétique (lorsqu'on ne tient pas compte du vent solaire)

## Aimant terre rare

Philips Components



U.S.C. - 1

1.0L

Philips

code

quantité

prix

1.0

prix

10.0

43134894 6430/  
RES2204.12X

114-0151

106.33

14.77

Figure 7 : Spécifications de l'aimant terre rare

\* Nous avons utilisé un aimant terre rare (fig. 7) pour la Terrela n°1 (Ø 30mm) et 3 aimants pour les Terrela n°2 et 3 (Ø 55 et 50mm).

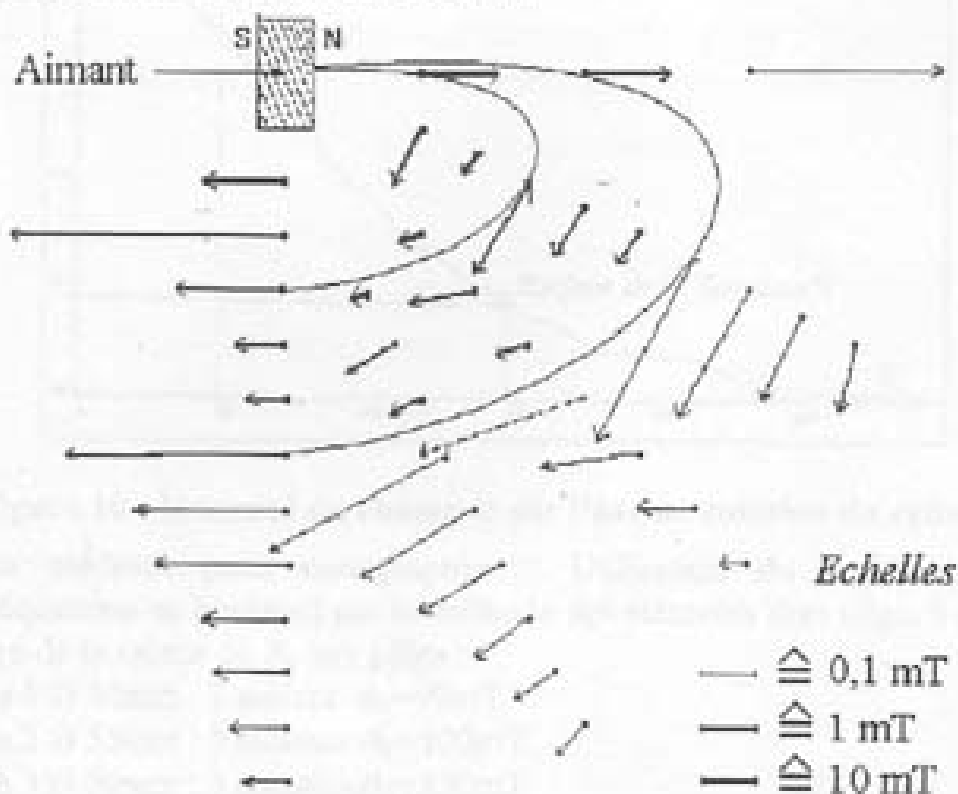


Figure 8 : Cartographie du vecteur  $\vec{B}$  dans un plan

\* Nous avons cartographié le champ  $\vec{B}$  dans un plan (l'aimant étant cylindrique, le spectre est valable pour tous les plans passant par l'axe (fig. 8)).

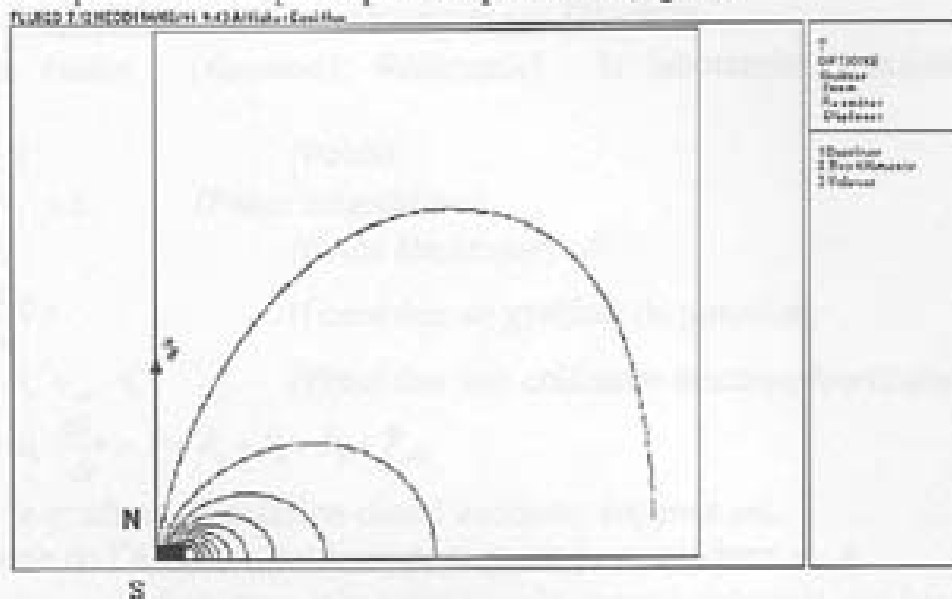


Figure 9 : Lignes de champ pour un aimant cylindrique avec FLUX2D

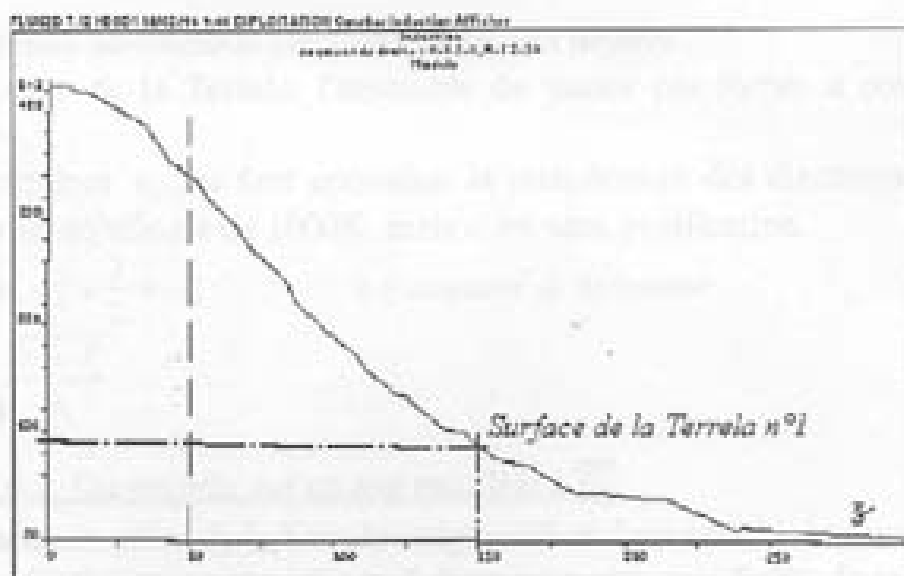


Figure 10 : Intensité du champ B sur l'axe de rotation du cylindre

\* Autre méthode pour cartographier : Utilisation du logiciel FLUX2D (Résolution des équations de Maxwell par la méthode des éléments finis (figs. 9 et 10).

\* Mesure de la valeur de  $B_0$  aux pôles :

Terrela 1 Ø 30mm : 1 aimant  $B_0=90\text{mT}$

Terrela 2 Ø 55mm : 3 aimants  $B_0=100\text{mT}$

Terrela 3 Ø 50mm : 3 aimants  $B_0=150\text{mT}$

## 5.4. Calcul du champ magnétique nécessaire pour obtenir les anneaux

### 5.4.1. Bilan des forces s'exerçant sur l'électron

Système étudié : {électron}; Référentiel : le laboratoire, considéré comme galiléen

$$\vec{P} = m_e \cdot \vec{g} \quad (\text{Poids})$$

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v}_e \wedge \vec{B} \quad (\text{Force magnétique})$$

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E} \quad (\text{Force électrique})$$

$$\vec{F}_p = -\frac{1}{n} \vec{\nabla} P \quad (\text{Force due au gradient de pression})$$

$$\vec{F}_{col} = -m_e \cdot \nu_m \cdot \vec{v}_e \quad (\text{Force due aux collisions électrons/particules neutres})$$

$$m_e \cdot \frac{d\vec{v}_e}{dt} = \vec{P} + \vec{F}_m + \vec{F}_e + \vec{F}_p + \vec{F}_{col}$$

$\vec{\nabla} P$  est le gradient de pression dans l'enceinte, supposé nul.

$m_e$  : masse de l'électron, suffisamment petite pour négliger  $m_e \cdot \vec{g}$

$\vec{v}_e$  : vitesse de l'électron. On veut que la force totale soit supérieure à 0, et probablement 10 ou 100 fois supérieure pour qu'un flux suffisant d'électrons arrive à la Terrela.

$\nu_m$  : fréquence de collision électrons/particules neutres.

Au voisinage de la Terrela, l'ensemble de toutes ces forces a communiqué à l'électron la vitesse  $\vec{v}_e$ .

Pour déterminer  $\nu_m$ , il faut connaître la température des électrons  $T_e$  (ou leur énergie). On suppose qu'elle est de 1000K, mais c'est sans justification.

$$E_e = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T_e \quad k = \text{constante de Boltzmann}$$

$$\Rightarrow v_e = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T_e}{m_e}}$$

### 5.4.2. On projette sur un axe parallèle à $\vec{F}_m$

On se place aux pôles de la Terrela : région où se forment les anneaux (anode)

Le champ électrique ne permet pas d'obtenir les anneaux, l'effet de rotation est dû au champ magnétique et aux différentes collisions.

Au voisinage des pôles de la Terrela,  $\vec{E}$  est parallèle à  $\vec{B}$ . La force électrique  $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$  est perpendiculaire à la force magnétique  $\vec{F}_m = q \cdot \vec{v}_e \wedge \vec{B}$ . La force électrique n'intervient donc pas dans ce calcul.

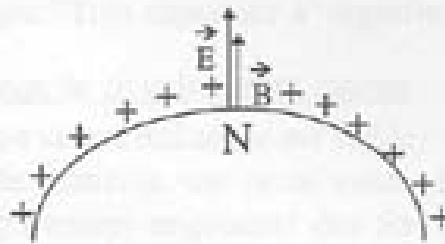


Figure 11 : Champ magnétique et champ électrique au pôle Nord de la Terre

$$|q| \cdot v_e \cdot B - m_e \cdot v_{ne} \cdot v_e \gg 0 \quad \Rightarrow \quad B \gg \frac{m_e}{|q|} v_{ne}$$

Il faut déterminer  $v_{ne}$ .

Par définition,  $v_{ne} = \rho_n \cdot \sigma \cdot v_e$

$\rho_n$  est la concentration ( $m^{-3}$ ) de particules neutres

$\sigma$  est la section efficace de collision électrons/particules neutres

On trouve donc :

$$B \gg \frac{m_e}{|q|} \cdot \rho_n \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T_n}{m_e}}$$

$\rho_n$  est évalué à partir de la pression :  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T_n \Rightarrow P = \rho \cdot k \cdot T_n \Rightarrow \rho = \frac{P}{k \cdot T_n}$

$T_n$  = température des particules neutres  
= température ambiante

$$B \gg \frac{m_e}{|q|} \cdot \frac{P}{k \cdot T_n} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T_n}{m_e}}$$

$$\Rightarrow B \gg \frac{P \cdot \sigma}{|q| \cdot T_n} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot T_n \cdot m_e}{k}}$$

### 5.4.3. Application numérique

$P = 0,66 \text{ mbar} = 0,66 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$

$\sigma$  est (à 0,1eV, c'est à dire à ces énergies) plus proches de  $10^{-15}$  que  $10^{-16} \text{ cm}^2$

$\sigma = 10^{-19} \text{ m}^2$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$        $|q| = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$T_n = 300 \text{ K}$      $T_e = 1000 \text{ K}$      $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Dans un premier temps, calculons ce qui est constant :

$$B \gg \frac{\sqrt{3 \cdot m_e}}{\sqrt{k} \cdot |q|} \cdot \frac{P \cdot \sigma \cdot \sqrt{T_n}}{T_n}$$

$$B \gg 2,78 \cdot 10^{13} \times \frac{P \cdot \sigma \cdot \sqrt{T_n}}{T_n}$$

Il est intéressant de noter que  $B$  est peu sensible à  $T_n$  (en racine), mais proportionnel à  $P$ ,  $\sigma$  ou  $T_n$ .

$$B \gg 2,78 \cdot 10^{13} \times \frac{0,66 \cdot 10^{-2} \times 10^{-19} \times \sqrt{1000}}{300} \approx 2 \text{ mT}$$



Nous avons eu besoin, pour notre expérience, de 100 à 150mT, soit 50 à 75 fois plus, ce qui donne une idée de ce que "Très supérieur à" signifie.

#### 5.4.4. Les limitations de ce calcul sont claires

1/  $T_c$  est mal connue (même si son influence est faible)

2/ Il existe un gradient de pression, car nous avons constaté des fuites. Un tel gradient de pression peut très rapidement engendrer des forces de l'ordre de forces de collision, qui s'opposent au mouvement (signe - de l'équation)

3/ On tient compte d'une géométrie simplifiée. En particulier, le champ dipolaire décroît en  $1/r^3$  ! A quelques centimètres de la sphère, il n'est plus que de 10mT (les lignes de champ prennent leur source plus bas qu'aux pôles). Il faut donc considérer que l'intensité du champ magnétique que nous calculons est supérieur à 100mT.

### 6. Comparaison entre le spectre de la décharge et celui des aurores

#### *6.1. Obtention du spectre*

Nous avons réalisé le spectre grâce à un monochromateur couplé à un photomultiplicateur. La longueur d'onde du spectre est lue sur le curseur du monochromateur. L'intensité lumineuse est proportionnelle à l'intensité du courant traversant le photomultiplicateur.

Le monochromateur est équipé d'un système de visée qui permet de déterminer le spectre en un point précis de la décharge. La précision de la mesure dépend de l'ouverture des fentes de visée.

#### *6.2. Résultats*

La lumière émise par la décharge se compose de trois raies. Ces trois raies se retrouvent dans le spectre des aurores à basse altitude. Elles correspondent aux raies de  $N_2^+$  (voir doc. 2).

### 6.3. *Interprétation*

Pourquoi n'observe-t-on que les trois raies de  $N_2^+$ ? Il y a deux raisons :

Les pressions utilisées par la manipulation correspondent à celles de la basse ionosphère (50Pa correspondent à 55km) où se trouvent les ions  $N_2^+$ . Birkeland observait ce même rayonnement.

Le photomultiplicateur n'est pas sensible aux radiations rouges. Il est possible d'observer des raies rouges avec un spectrographe portable. Ces raies correspondent probablement à  $N_2$  excité (Raies entre 650 et 680 nm).

## 7. Face aux nombreux problèmes rencontrés, les solutions trouvées

### 7.1. *Le vide*

Au départ, il a été difficile d'obtenir une pression suffisamment basse à l'intérieur de la cloche avec la vieille pompe du lycée. Par ailleurs, le vide ne tenant pas, il a fallu graisser le joint sur lequel la cloche était posée. Pour empêcher toute pénétration d'air dans la cloche, les fuites ont été colmatées par de la colle

### 7.2. *Les fuites*

#### 7.2.1. Fuites d'air

Afin de connaître la pression à l'intérieur de la cloche, un manomètre digital a en premier lieu été utilisé. Mais la présence de fuites au niveau du joint torique sur le haut de l'appareil nous a obligés à l'enlever. Il a été remplacé par un manomètre Pirani.

#### 7.2.2. Fuites électriques

Il existe également un autre genre de fuites, celles qui interviennent entre les électrodes: la décharge ne se fait pas forcément comme on le souhaiterait. En particulier il est arrivé que la décharge se fasse à partir du bas du fil de cuivre servant de cathode et non à partir du haut, ce qui faussait l'expérience. Nous avons donc du placer à plusieurs reprises du ruban adhésif isolant autour des électrodes.

### 7.3. *La tension*

Avec le générateur du lycée utilisé au début, l'intensité du courant débité ne pouvait dépasser 2mA. Cela nous empêchait d'obtenir des anneaux bien visibles car le flux d'électrons n'était pas assez important. Nous avons alors essayé d'alimenter notre montage avec une bobine de Ruhmkorff pour avoir plus d'intensité, mais l'aspect intermittent de la décharge ne permettait pas une bonne observation. Nous avons donc dû utiliser une alimentation pouvant débiter un courant suffisant.

### 7.4. *L'aimant*

Les premiers aimants ont été donnés par les chercheurs de l'I.P.N. (ils ont été récupérés sur les portes des placards où ils servaient à maintenir des affiches) et leur champ magnétique n'était pas suffisamment important pour dévier les électrons. Des

aimants en terre rare ont donc dus être achetés. Associés par trois, ils donnent un champ de valeur 150mT aux pôles de la Terrela.

### *7.5. La résistance*

Lorsque l'intensité du courant est trop élevée, le générateur disjoncte. Nous avons alors inséré une résistance dans le circuit, afin de faire diminuer l'intensité du courant (loi d'Ohm). En premier lieu, des résistances de " récupération " ont été utilisées. Mais elles fondaient car elles n'étaient pas prévues pour une telle puissance ( $P=UI=2000 \times 0,02=40W$ ). Nous avons alors essayé d'en placer plusieurs en parallèle pour répartir le courant; mais il fallait alors des résistances de grande valeur pour arriver à une résistance totale de 100k $\Omega$  et nous n'en avions pas beaucoup. De plus, malgré le fait que nous les ayons placées dans de l'huile pour éviter qu'elles ne chauffent trop, leur température augmentait au fur et à mesure de l'expérience et leur résistance variait à cause de ce réchauffement. Nous avons donc dû acheter deux résistances de puissance de 100k $\Omega$ .

### *7.6. La pompe*

La pompe que nous avons acheté pour remplacer celle du lycée n'est pas équipée de clapet anti-retour, ce qui fait que l'huile peut être rejetée par le tuyau de pompage si on l'arrête. Il est donc arrivé qu'elle rejette toute son huile à l'intérieur de la cloche. Pour éviter cela, il faut prendre la précaution de fermer le robinet qui la relie à la cloche avant de l'arrêter.

### *7.7. Importance de la position de la Terrela par rapport à la cathode*

Pour obtenir deux anneaux sur la Terrela, il faut positionner la sphère de façon à ce que les deux pôles de l'aimant soient à égale distance de la cathode. Il suffit du moindre déplacement (de quelques millimètres) de la cathode ou de la Terrela pour qu'un anneau disparaisse!

### *7.8. Conclusion*

Ce travail aura ainsi exigé du temps et de la patience. Mais bien loin d'avoir découragé les élèves, les multiples problèmes rencontrés n'ont fait qu'accroître la joie de voir leurs objectifs atteints et leur ont permis de mieux apprécier le fruit de leurs efforts.

## 8. Conclusion et perspectives

Les objectifs du départ (obtenir des aurores polaires artificielles et comprendre les propriétés physiques liées à ce phénomène) ont ainsi bien été atteints.

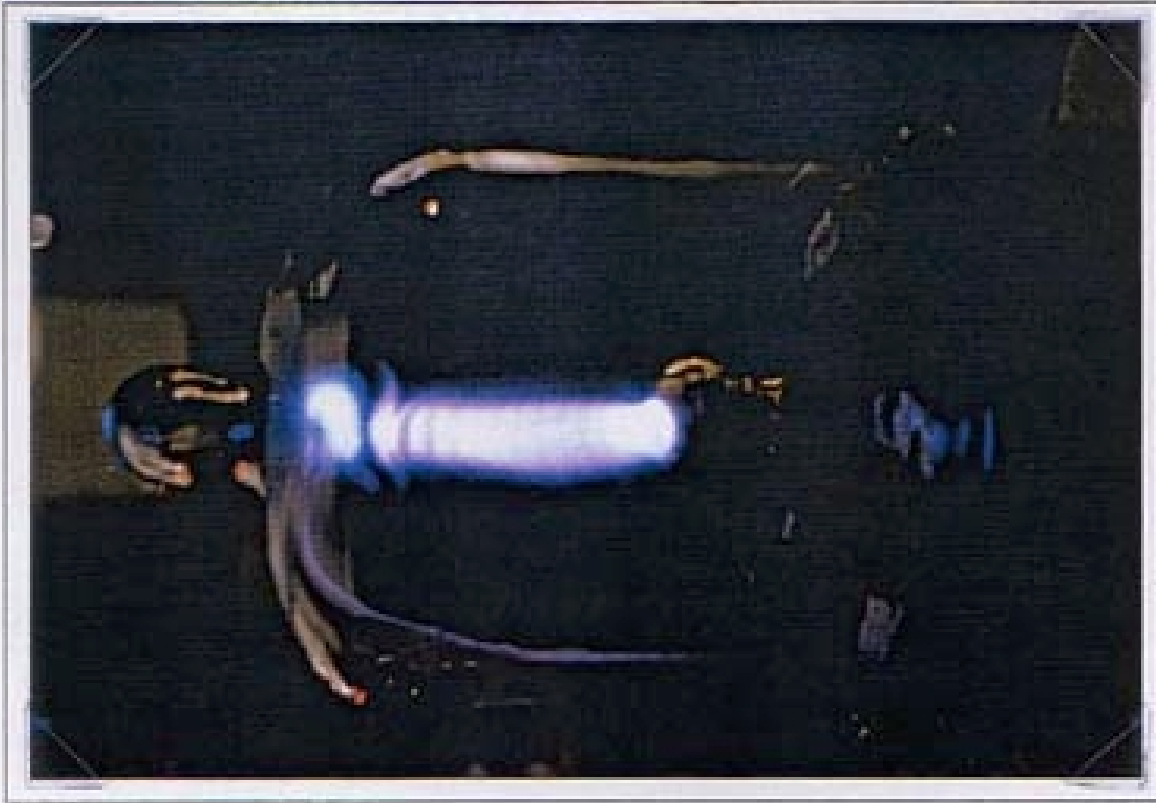
Le phénomène des aurores polaires attire aujourd'hui la curiosité de scientifiques originaires de lieux géographiques les plus divers. Ils sont Chinois, Norvégiens, Japonais, Australiens,... Ils cherchent tous à explorer ce domaine en profondeur ... un phénomène qui, depuis l'Antiquité, a intrigué bon nombre de personnes. Et si Birkeland en a proposé une théorie générale il y a un siècle, il n'en reste pas moins que de nombreux points demeurent encore inexplicables. En effet, bien que les connaissances scientifiques se soient beaucoup étendues depuis Birkeland, les physiciens ne parviennent toujours pas :

- à expliquer ce qui se passe exactement dans la zone dite de reconnexion
- à justifier les formes des aurores.

Le "mystère" des aurores polaires est bien loin d'être totalement éclairci!

De plus, cette manipulation nous a permis d'aborder de nombreux points du programme de Terminale, comme le champ magnétique, le champ électrique et les émissions de photons. L'expérience de Birkeland peut, sous cette forme, être montée et exploitée par n'importe quel lycée pour illustrer le programme de Terminale S.

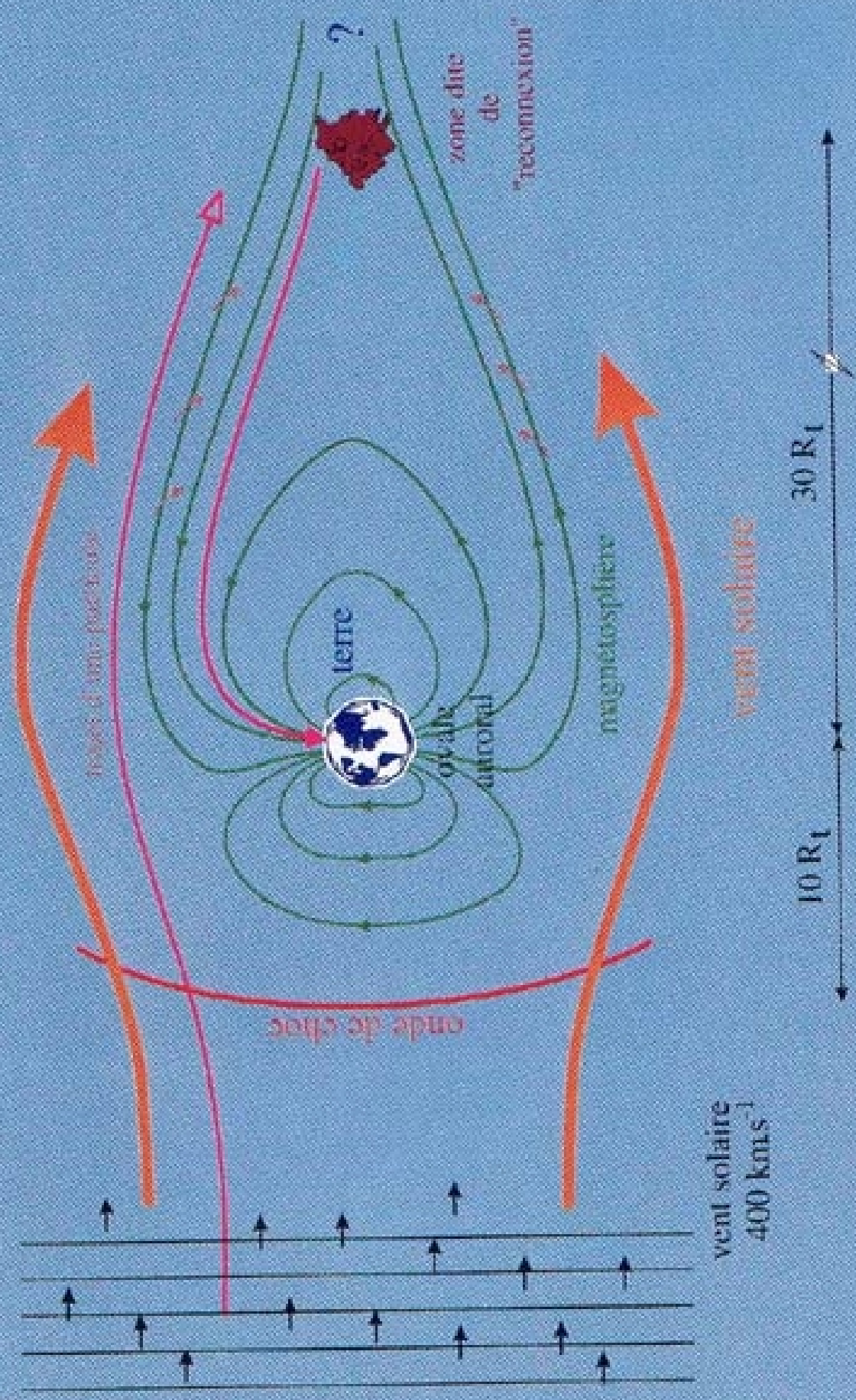
Les élèves remercient vivement les chercheurs et enseignants qui ont su les conseiller, les encourager et les aider à mener à bien leur projet.



DECHARGE ELECTRIQUE ET  
OBTENTION DES ANNEAUX  
SUR LA TERRELA N°1



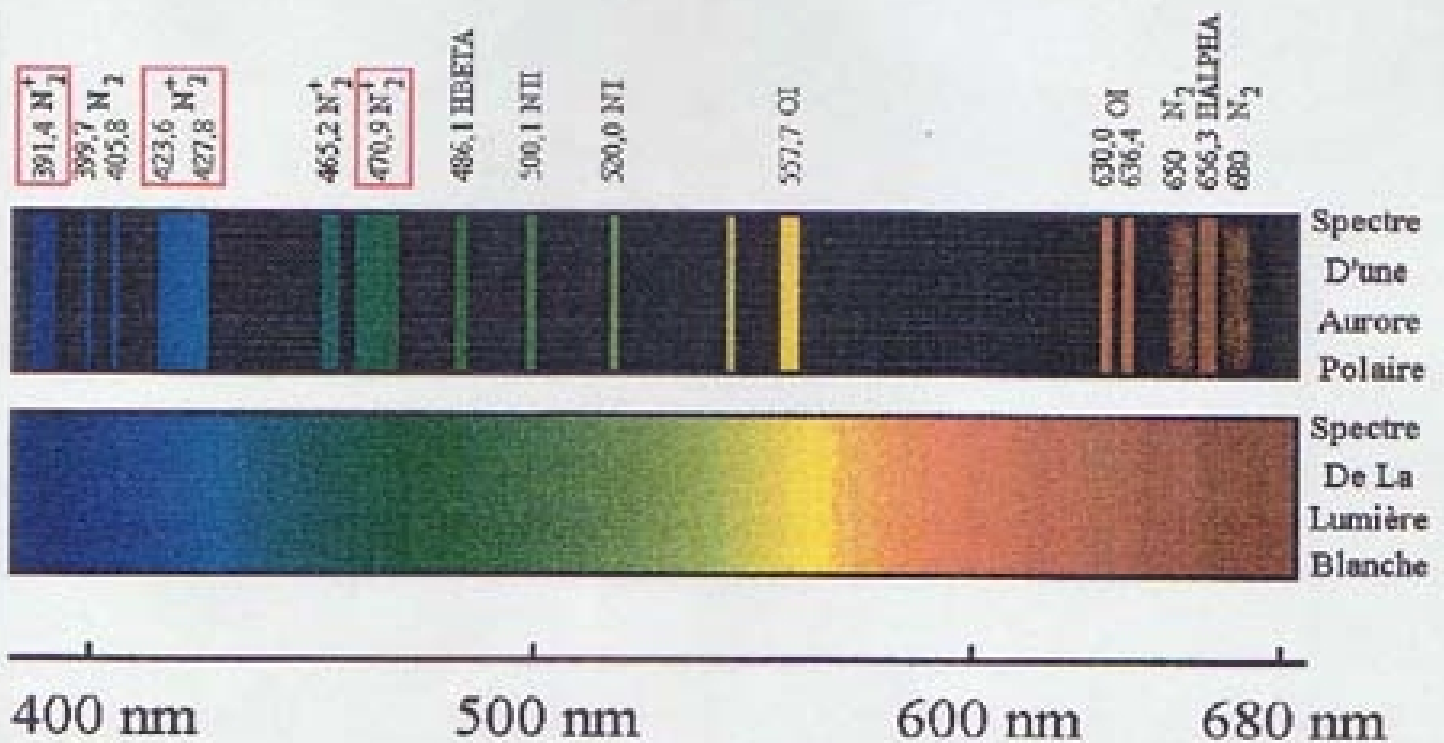
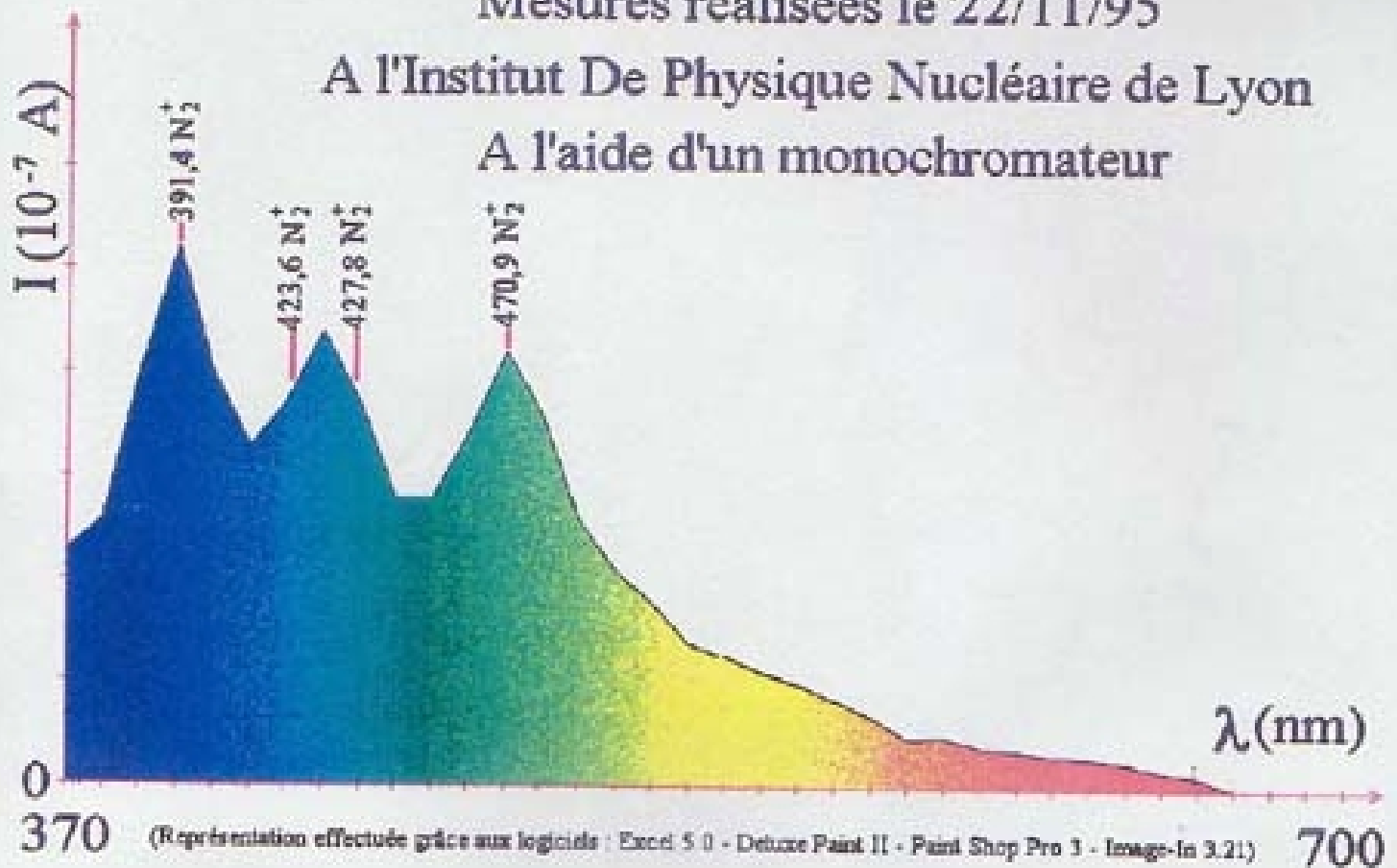
AURORE POLAIRE A TROMSØ  
LE 1.11.95  
21 HEURES



document 1

Mesures réalisées le 22/11/95

A l'Institut De Physique Nucléaire de Lyon  
A l'aide d'un monochromateur



DOCUMENT 2

LONGUEUR D'ONDE

(Représentation effectuée grâce aux logiciels : Deluxe Paint II - Paint Shop Pro 3 - Image-In 3.21)