

RÉALISATION D'UNE TERRELLA

Billel Hassainil, Kaan Karacelik, Emy Morent, Giuliano Van Caemerbeke
 élèves du lycée Colbert de Tourcoing

Un pari audacieux tenté par des élèves du lycée Colbert de Tourcoing dans le cadre des Olympiades de physique : reconstituer un dispositif permettant de simuler des aurores polaires comme Kristian Birkeland l'avait fait au tout début du xx^e siècle avec sa « Terrella ».

Nous sommes un groupe de quatre adolescents issus de trois classes différentes : Emy est en seconde générale, Kaan et Giuliano en première générale avec spécialité physique-chimie, Billel est en terminale générale avec spécialité physique-chimie.

Voici l'histoire de notre engagement dans ce projet.

Cela a commencé lorsque Billel, en classe de première cette année-là, a souhaité réaliser une boule à plasma afin de participer aux Olympiades de physique. Cela n'étant pas facile à réaliser et étant peu aisé à comprendre car les composants ne sont pas étudiés dans les programmes de lycée, notre professeur de physique et de chimie lui a proposé de travailler sur le thème des aurores boréales dans laquelle la notion de plasma est également présente. Billel a donc travaillé d'arrache-pied. Un an plus tard, il a eu besoin de camarades avec qui développer ses recherches. Il a passé une petite annonce dans le lycée et c'est ainsi que Giuliano, Kaan et Emy l'ont rejoint pour compléter le quatuor. Kaan était d'autant plus intéressé que des aurores étaient visibles en France depuis plusieurs semaines. Il avait réussi à photographier une aurore boréale depuis son jardin de Roncq (Nord), le soir de l'orage magnétique du 10 mai 2024 (voir figure 1).



Fig.1. Aurore à Roncq (Nord) la nuit du 10 au 11 mai 2024, iPhone 11 Photo Kaan.

Nous avons donc travaillé à la compréhension de ce beau phénomène. Nous avons aussi eu la chance de discuter avec Jean Lilensten, spécialiste français du sujet travaillant à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble (IPAG).

Plan

- Qu'est-ce qu'une aurore polaire ?
- Comment les simuler ?
- Comment simuler le rôle du champ magnétique terrestre ?

L'aurore polaire

L'événement d'aurore polaire ayant été bien décrit dans le n°186 des Cahiers Clairaut, nous allons donc vous présenter le dispositif principal utilisé lors du concours pour simuler des aurores polaires. Ce dispositif est inspiré de l'invention de la « Terrella » de Kristian Birkeland (voir figure 2).

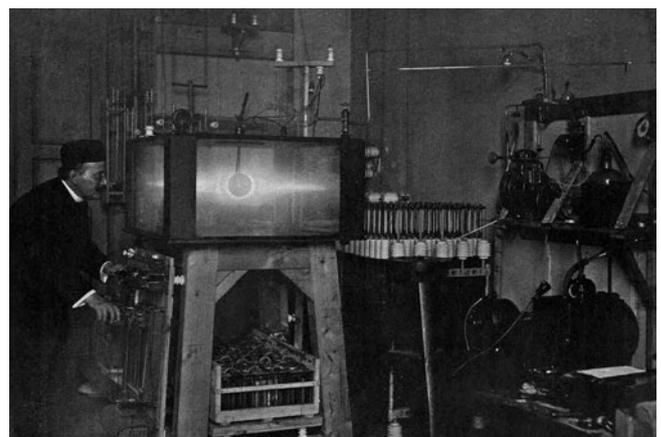


Fig.2. Kristian Birkeland et sa Terrella (crédits Wikipédia).

Comment simuler l'interaction entre particules du vent solaire et particules de l'atmosphère ?

Nous savons qu'une aurore boréale se produit lorsqu'il y a des particules éjectées à grande vitesse du Soleil et

qu'elles interagissent avec les composantes de la haute atmosphère terrestre.

Pour simuler ce vent solaire, nous avons décidé d'utiliser un générateur haute tension (6 000 V) relié à deux électrodes placées sous une cloche à vide (voir figure 3).

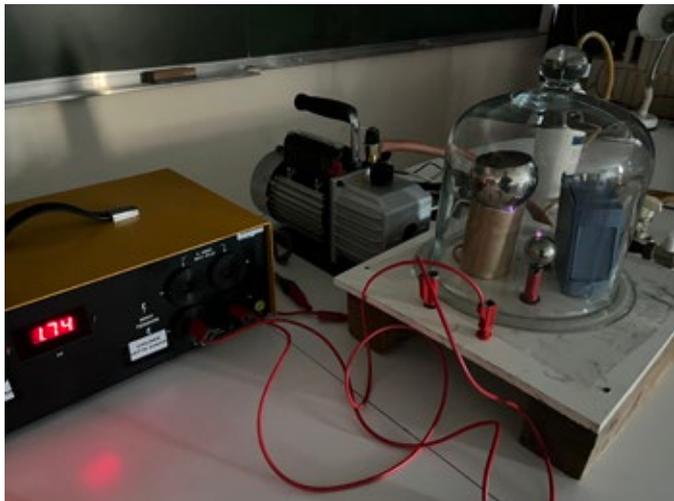


Fig.3. Photo du dispositif. Les deux électrodes sont issues du matériel d'électrostatique et sont alimentées par un générateur haute tension (6 kV). La grande peut accueillir un aimant. Sous la cloche à vide, nous avons aussi placé un pressiomètre. Crédit A Durieux.

Ces deux électrodes sont placées sous un vide partiel pour recréer les conditions de haute atmosphère. Lorsqu'on descend sous une pression de 50 hPa on commence à voir apparaître une lueur rose entre les deux électrodes (voir figure 4).



Fig.1. Un plasma s'établit entre les deux électrodes. La désexcitation des ions N_2^+ produit la lumière rose. Crédit A Durieux.

Nous avons caractérisé cette lumière à l'aide d'un spectrophotomètre et Jean Lilensten nous a indiqué qu'il s'agissait de la lumière produite par la désexcitation du diazote ionisé N_2^+ .

Sous l'intense champ électrique, des électrons sont arrachés et accélérés. Ils possèdent une énergie suffisante (voir encadré A) pour ioniser le diazote présent et former

l'ion N_2^+ . Par effet cascade, cet ion peut aider à la formation d'un autre ion et ainsi de suite : on a ainsi la formation d'un plasma. La désexcitation de ces particules nous donne cette lumière rose (voir encadré B).

À force de faire des essais, le plasma a commencé à faire fondre les bornes électriques de notre plateau et les décharges ne se faisaient plus entre les deux électrodes mais entre la base des fils électriques et le plateau métallique. (voir figure 5).



Fig.5. Le plastique des bornes électriques présentes sur le plateau d'origine a fondu à cause de décharges observées entre la base des fils électriques et le métal du plateau. Crédit A Durieux.

Nous ne parvenions plus à utiliser notre Terrella. Nous avons donc dû reconstruire notre propre plateau dans un matériau isolant : une plaque murale pour cabine de douche (voir figure 6). Ce choix nous a créé un autre problème, comme nous le verrons après...

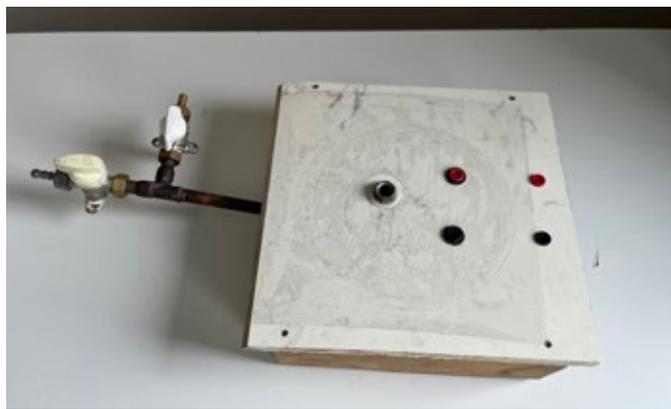


Fig.6. Notre nouveau plateau, créé dans un matériau isolant. Crédit A Durieux.

Simuler le rôle du champ magnétique terrestre

Mais pour simuler une aurore boréale, il faut aussi simuler le champ magnétique terrestre car il joue un rôle important en déviant les particules du vent solaire. Comme les lignes de champ magnétique de la Terre sont comparables à celle d'un aimant droit, nous avons donc placé un aimant droit à l'intérieur de l'une des électrodes, qui était creuse (voir figure 3). Cependant cette électrode étant composée

d'acier, les lignes de champ magnétique n'étaient plus du tout celles d'un aimant droit et cela ne nous permettait pas de prévoir la déviation des électrons. Il aurait fallu que nous disposions d'une électrode creuse dans un métal non magnétique, en aluminium par exemple.

Utiliser l'aimant directement en tant qu'électrode aurait pu être envisagé mais dans ce cas, nous ne pouvions plus espérer simuler les ovales auroraux. En effet, les ovales auroraux existent car le champ magnétique terrestre est créé au centre de la Terre et non aux pôles. Au lieu de chercher en vain une électrode creuse convenable, nous aurions plutôt dû essayer quand même d'utiliser notre aimant comme électrode...

De toutes façons, Jean Lilensten nous a fait comprendre que notre Terrella ne nous aurait pas permis d'obtenir ces ovales : d'une part, parce que nous ne parvenions pas à reproduire le champ magnétique d'un aimant droit, d'autre part parce que le libre parcours moyen des électrons était trop faible dans notre dispositif (voir encadré A).

Monsieur Lilensten nous a recommandé de baisser la pression à quelques pascals de manière à augmenter le libre parcours moyen et permettre ainsi au plasma de s'étendre et de pouvoir faire le tour de l'électrode (et ainsi de simuler les ovales auroraux).

Le problème c'est que le plateau sous notre cloche à vide

se déformait lorsque le vide était trop poussé et cela créait des fuites sous la cloche à vide. Cela était dû à notre choix de matériau pour refaire le plateau.

Nous n'avons pas eu le temps de le renforcer ni d'augmenter l'étanchéité sous la cloche à l'aide d'un joint torique pour le concours.

Pour illustrer l'influence du champ magnétique lors du concours nous avons utilisé un tube de Perrin et des bobines de Helmholtz (voir figure 7). Ce dispositif permet d'envoyer des électrons, à l'aide d'un canon à électrons, dans une ampoule contenant un gaz raréfié. Ce dernier émet une lueur bleutée à chaque contact avec un électron. L'ensemble de ce phénomène se passe également sous un vide partiel.

De plus, autour de cette ampoule sont placées deux bobines de Helmholtz permettant de créer un champ magnétique. Ce champ magnétique est essentiel car il permet de diriger le faisceau d'électrons lorsqu'on tourne l'ampoule et d'obtenir un cercle. Voilà qui nous ramenait aux ovales auroraux.

Bilan

Nous avons réussi à reproduire et à simuler une partie des paramètres intervenant dans les aurores polaires : l'accélération des particules et l'interaction avec de la matière sous vide partiel, créant de la lumière. Cependant, la complexité du phénomène ne nous permettait pas de tout expliquer et encore moins dans une seule manip. Certains points auraient pu être améliorés, nous aurions par exemple aimé montrer que l'introduction de gaz différents dans la cloche permettait un changement de couleurs des aurores (cela a été testé avec du CO_2 mais cela n'a pas été probant lors du concours). Nous aurions aussi aimé pouvoir mieux illustrer le rôle du champ magnétique terrestre (et il y a aussi un champ magnétique porté par les particules de vent solaire).

Notre objectif de départ : comprendre pourquoi des aurores boréales se sont produites dans le Nord de la France, a abouti. Nous avons réussi à réaliser, à l'aide du matériel présent au lycée, un dispositif permettant de simuler des aurores boréales et d'obtenir des résultats exploitables (par analyse spectrale).

La rencontre, fin janvier 2025 à Marseille, d'autres élèves passionnés de science comme nous, à l'occasion des Olympiades de physique, fut une belle expérience. Lors de ce concours, nous avons exposé les points suivants :

- qu'est-ce qu'une aurore polaire ?
- pourquoi a-t-on pu en observer en France ces derniers temps ?
- pourquoi voit-on différentes couleurs ?
- comment en simuler au lycée ?

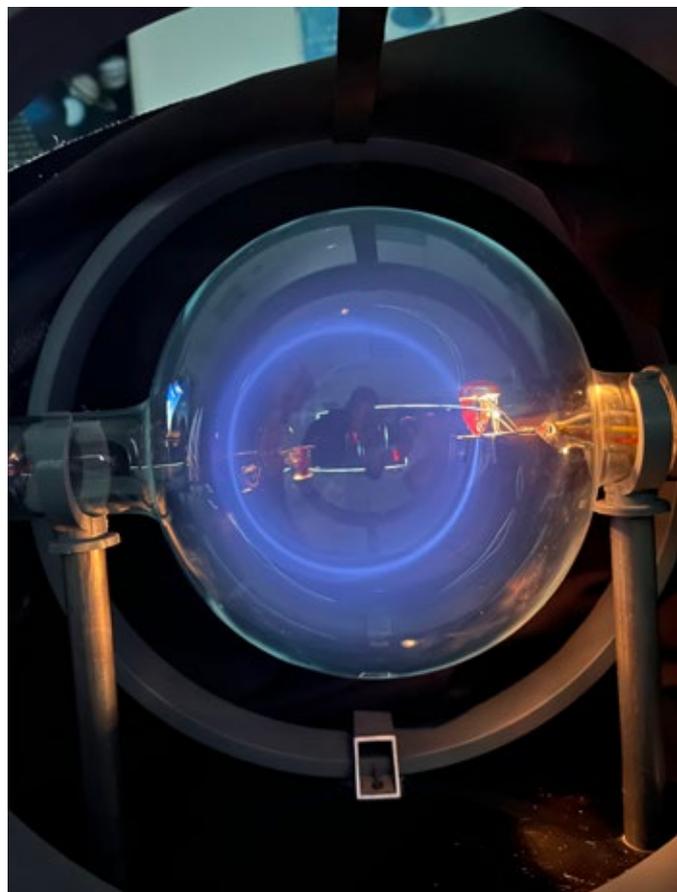


Fig.7. Tube de Perrin utilisé avec les bobines de Helmholtz. Crédit A Durieux.

Nous sommes très fiers des résultats intéressants que nous avons réussi à obtenir tout au long de ce projet même si nous sommes conscients qu'il reste des points à améliorer.

Nous tenons à adresser nos remerciements aux personnes qui nous ont aidés dans la réalisation de ce projet : Monsieur Lilensten mais aussi Monsieur Pujol, de l'université de Lille qui nous a prêté un spectrophotomètre à fibre optique. Nous remercions particulièrement notre professeur de physique-chimie, Monsieur Durieux : sa

disponibilité, ses connaissances et son soutien ont été des éléments essentiels qui ont permis de mener à bien cette initiative. Sans toutes ces contributions, ce projet n'aurait pas pu voir le jour. Vous pourrez retrouver ci-dessous la bibliographie que nous avons utilisée. Nous espérons également que vous avez pris plaisir à lire ce texte et que, tout comme nous, vous avez été émerveillé par le fascinant sujet des aurores boréales ! ■

Encadré A : libre parcours moyen et énergie

Dans un matériau, la distance maximale que peut parcourir une particule sans en rencontrer une autre est appelée libre parcours moyen, noté ici λ . Il dépend de la pureté du matériau et de sa température.

Calcul du libre parcours moyen dans le diazote :

$$T = 293 \text{ K}$$

$$\sigma = 315 \text{ pm} = 3,15 \cdot 10^{-10} \text{ m (diamètre de la molécule)}$$

$$\lambda = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}\sigma^2 p} = \frac{1,38 \cdot 10^{-22} \times 293}{\pi\sqrt{2}(3,15 \cdot 10^{-10})^2 \times p} \approx \frac{9 \cdot 10^{-2}}{p}$$

$$\text{Si } p = 1000 \text{ hPa} \quad \text{alors } \lambda = 9 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 0,09 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\text{Si } p = 50 \text{ hPa} \quad \text{alors } \lambda = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 18 \text{ } \mu\text{m}$$

Dans notre expérience, les électrons se trouvent sous la cloche entre les deux électrodes d'un générateur haute tension : ils sont soumis à la force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$ où \vec{E} est le champ électrique existant entre les deux électrodes.

On peut calculer le travail de cette force le long du libre parcours moyen :

$$W_\lambda(\vec{F}_e) = F_e \times \lambda = |q| \times E \times \lambda$$

Avec :

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{5000}{0,05} = 1 \times 10^5 \text{ V/m}$$

$$\lambda = 18 \text{ } \mu\text{m} = 1,8 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\text{On obtient } = W_\lambda(\vec{F}_e) = 1,8 \text{ eV}$$

On trouve une valeur qui est de l'ordre de grandeur des transitions entre les niveaux d'énergie des molécules présentes. Cela justifie pourquoi nous voyons une lumière apparaître lors de notre expérience.

Encadré B : calcul pour la transition énergétique E2 -E1 de l'azote

$$\Delta E = \frac{h \times c}{\lambda} = 3,1 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{h \times c}{\Delta E} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{(3,1 \times 1,6 \cdot 10^{-19})} \approx 4,01 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

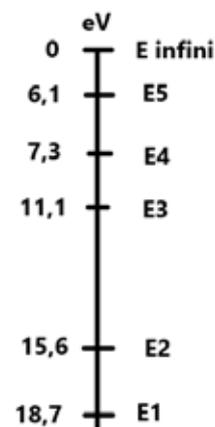
$$\lambda \approx 401 \text{ nm}$$

Cela correspond à la longueur d'onde du violet.

L'atome d'azote émet donc du violet lorsqu'il effectue la transition de l'étage E2-E1.

Remarque : L'ion N_2^+ possède des niveaux d'énergie démultipliés, c'est-à-dire qu'il y a beaucoup plus de niveaux d'énergie autour des niveaux de l'atome d'azote. Son spectre contient aussi des raies de longueur d'onde proches de 400 nm.

DIAGRAMME NIVEAU D'ENERGIE DE L'ATOME D'AZOTE



Bibliographie et sources :

- Planeterrella.osug.fr
- Wikipedia sur Kristian Birkeland et les aurores boréales.
- Journal en ligne *le Point* pour les aurores aperçues dans le Nord (2/12/2023). https://www.lepoint.fr/science/des-aurores-boreales-illuminent-le-ciel-du-nord-de-la-france-02-12-2023-2545473_25.php

- Conférence RCE 2018 - Les aurores dans le ciel et en laboratoire avec la Terrella » tenue par Antoine Viel. <https://www.youtube.com/watch?v=ayv6nPs8tZ0>
- *Les aventures d'Anselme Lanturlu: Pour quelques ampères de plus* de Jean-Pierre Petit. <https://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/amperes.htm>
- Source Agence spatiale canadienne : <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/astronomie/auores-boreales/qu-est-ce-qu-une-aurore-boreale.asp> <https://gq.mines.gouv.qc.ca/geologie-pour-tous/geomagnetisme/>
- aurora-maniacs.com , indice Kp.
- Cahier Clairaut 186 de juin 2024.