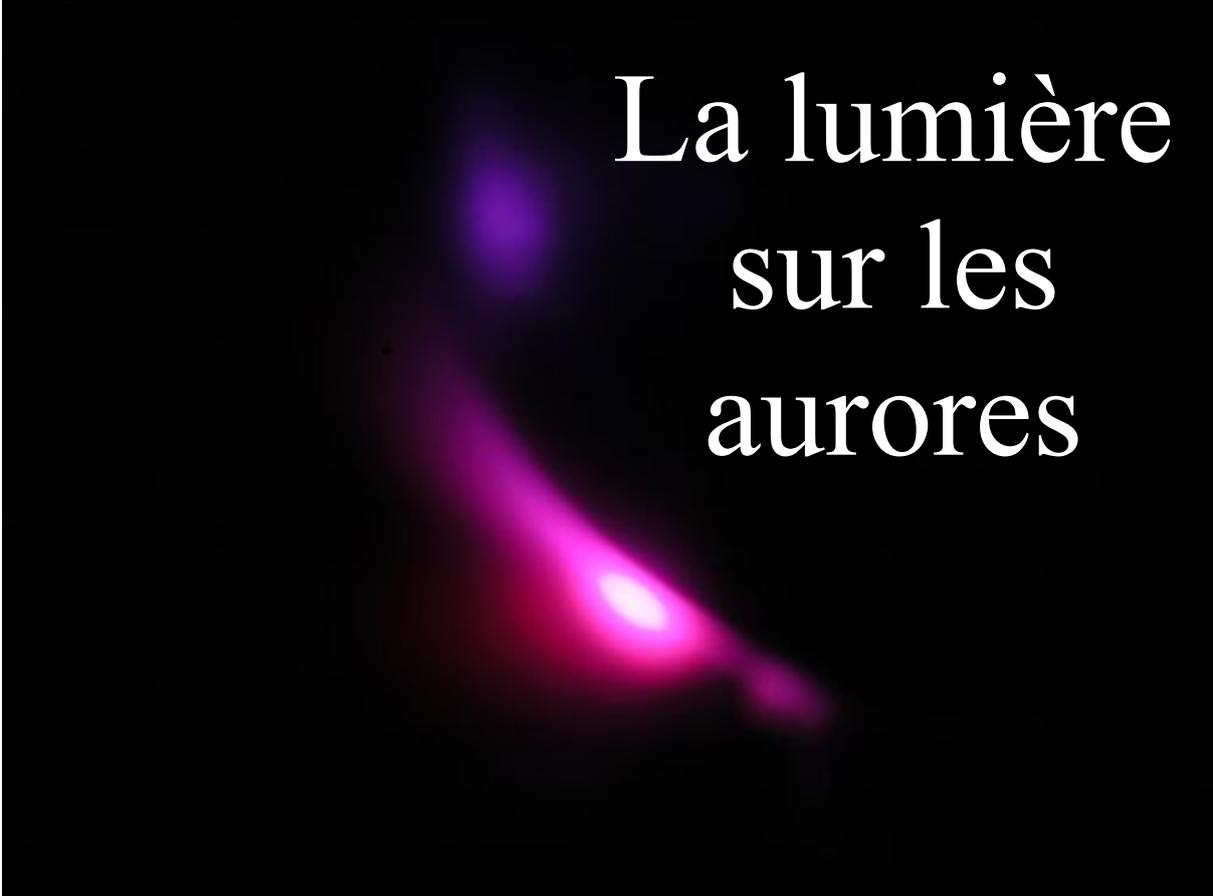




OLYMPIADES DE PHYSIQUE
XVIII^E ÉDITION



La lumière
sur les
aurores

Nathan ALLOUCHE
Louis CAMMARATA
Walid GHANEM
Nils HOLZENBERGER
Élèves de terminale

Madame GOURGEOT
Monsieur FAYE
Professeurs au lycée

Lycée Louis-le-Grand (Paris)

RÉSUMÉ

L'aurore polaire, manifestation spectaculaire des hautes altitudes, n'a cessé de fasciner les Hommes. Au carrefour de la physique des plasmas, de l'optique quantique et de l'électromagnétisme, l'aurore garde encore quelques secrets et reste sujet de la recherche actuelle. Nous reproduisons les conditions de l'ionosphère sous une cloche à vide. Une sphère aimantée placée en anode représente notre Terre qui subit les assauts du vent solaire, simulé par un flux d'électrons. Ceux-ci déviés vers les pôles par le champ magnétique excitent les quelques molécules de gaz présentes, engendrant des spectres d'émission caractéristiques. Qu'en est-il sur d'autres planètes ? En mettant d'autres gaz sous la cloche, nous simulons des aurores extraterrestres. L'étude de ces aurores peut donner des informations sur l'atmosphère d'une planète et de son champ magnétique. L'aurore, outil de demain pour les astrophysiciens ?

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	page 3
II. L'EXPERIENCE	page 5
III. CONCLUSION	page 16
IV. ANNEXES	page 18

Ce projet a été généreusement soutenu par la société Air liquide.



En couverture : Aurore polaire en laboratoire

I. INTRODUCTION

1) Les aurores polaires et les hommes

Les aurores polaires sont des manifestations lumineuses des hautes latitudes qui ont depuis toujours intrigué les hommes. Lorsque l'on a la chance de voir une aurore boréale, ce qui frappe est la beauté de cet impressionnant phénomène. Les photographies et les films ne peuvent pas remplacer la réalité et l'émotion intense qu'il suscite. Comment la nature peut-elle créer un tel spectacle ? Que se cache-t-il derrière les aurores boréales et australes ?

Les aurores ont fait fonctionner l'imagination des humains au cours des âges. Dans les pays nordiques, le folklore regorge de croyances et de légendes à ce propos. Les aurores sont associées à la mort, à la fécondité, à la chance ou au malheur selon la provenance des légendes.

Les Inuits et les Indiens d'Amérique ont souvent interprété les aurores polaires comme la manifestation d'esprits des morts. Un mythe algonquin raconte que lorsque Nanahbozho le créateur de la Terre eut fini son travail, il s'est installé dans le Nord. Il y ferait de grands feux pour que les gens ne l'oublient pas, ce qui donnerait lieu aux aurores boréales. Seuls les Esquimaux de Point Barrow considéraient les aurores comme une mauvaise chose. Ils allaient même jusqu'à se munir de leurs couteaux pour les chasser. Certains mythes indiens voient encore les aurores polaires comme des feux destinés à faire bouillir d'énormes marmites. Les Menominee, du Wisconsin, croyaient que des géants du Nord tenaient en leur main d'immenses torches pour les éclairer lors de leur pêche à la lance.

Ces approches n'ont rien de scientifique à proprement parler, et ce n'est qu'à partir du XVII^e siècle que les aurores polaires ont été étudiées scientifiquement. Galilée et l'astronome français Pierre Gassendi furent les premiers à utiliser le terme d'aurore boréale. Au XVIII^e siècle, l'astronome britannique Edmond Halley avança que le champ magnétique terrestre serait un acteur de la formation des aurores boréales. La 1^{re} observation d'aurore australe dans l'océan Indien eu lieu en 1773, ce qui vint confirmer la théorie de De Mairan comme quoi le phénomène était miroir, c'est-à-dire se passait aux deux pôles. Le physicien norvégien Birkeland fut le premier à reproduire une aurore en laboratoire en 1895. A la fin du XIX^e siècle, il aboutit à la conclusion que les aurores sont dues à des décharges électriques provenant du Soleil. Dans un tube à décharge sous vide primaire, il remplace l'anode par une sphère aimantée, la « Terrella ». Lors de la décharge, il observe un anneau lumineux autour de chaque pôle de la Terrella, similaire aux anneaux auroraux. Lorsque la sphère est placée à la cathode, il observe un anneau équatorial. Birkeland fait à tort une analogie avec les anneaux de Saturne. Au début du XX^e siècle, Arthur Edwin Kennelly et Oliver Heaviside ont découvert l'ionosphère, la couche supérieure ionisée et donc conductrice de l'atmosphère terrestre. L'exploration spatiale a permis une meilleure connaissance des aurores polaires terrestres, mais aussi l'observation d'aurores polaires sur d'autres planètes comme Jupiter, Saturne et Mars.

2) Le phénomène auroral

A) L'ionosphère

Les aurores polaires se produisent dans l'ionosphère, située entre 60 et 1000 km d'altitude. C'est la partie de l'atmosphère ionisée par les rayonnements ultraviolets du Soleil. Elle est essentiellement constituée d'azote et d'oxygène moléculaires N₂ et O₂, et atomiques N et O. Les gaz de l'ionosphère sont sous forme de plasma, un mélange électriquement neutre d'électrons et d'ions positifs. Les ions sont pour la plupart monoatomiques du fait de

l'excitation par le rayonnement ultraviolet. La pression de l'ionosphère va de 10^{-2} à 10^{-4} Pa selon l'altitude. Afin de reproduire les conditions de l'ionosphère en laboratoire, on utilise une cloche à vide et une pompe à vide pour atteindre une basse pression.

B) L'activité solaire

Les aurores polaires visibles sont souvent consécutives à des perturbations magnétiques, manifestations de l'activité solaire.

Le Soleil n'a pas de champ magnétique global comme la Terre. Son magnétisme serait généré dans les taches sombres de la surface solaire, où le champ magnétique est élevé. Lorsque les taches ont différentes polarités, un tube de force magnétique peut se former. Les particules chargées sont conduites le long de cette ligne neutre par les forces de Lorentz et forment des boucles qui perturbent localement la surface solaire. La couronne des protubérances solaires doit ainsi sa forme à l'activité magnétique. Lorsque ce champ magnétique local subit des modifications, de violentes éruptions solaires peuvent avoir lieu, accompagnées d'expulsions radiales de plasma.

Ces expulsions de plasma font partie du vent solaire, qui est un flux de plasma éjecté de la haute atmosphère du Soleil. Ce vent s'échappe continuellement de la surface du Soleil et baigne ainsi l'ensemble du système solaire. Le vent solaire est constitué de protons, d'hélium et d'électrons se déplaçant à environ 450 km s^{-1} . Le vent solaire met deux à quatre jours pour atteindre la Terre. Les rafales de vent solaire particulièrement énergétiques sont appelées tempêtes solaires.

C) Le magnétisme terrestre

L'observation séculaire des aurores polaires a révélé que celles-ci se produisent près des pôles magnétiques, dans une zone appelée ovale auroral. Cette zone est en fait le point de convergence des lignes du champ magnétique. Par ailleurs, les aurores sont depuis longtemps associées à de fortes perturbations magnétiques au niveau des pôles : les lignes de télégraphe, téléphone sont perturbées par exemple. Il semble donc que le champ magnétique terrestre ait un rôle important dans le phénomène. En l'absence de vent solaire, le champ magnétique de la Terre serait celui d'un aimant droit. Actuellement, l'axe de ce champ est incliné d'environ 10° par rapport à l'axe de rotation. L'interaction du champ magnétique et du vent solaire a lieu à 15 rayons terrestres environ, où la trajectoire des particules du vent solaire est déviée suivant la forme du champ géomagnétique. Ainsi pratiquement aucune particule ne traverse ce qu'on appelle la magnétopause, située typiquement à 10 rayons terrestres côté jour, valeur qui peut descendre jusqu'à 7 après de fortes éruptions solaires. L'espace derrière la magnétopause, relativement protégé du vent solaire, s'appelle la magnétosphère. Elle entoure la Terre, dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés ou organisés par son champ magnétique. Elle est située au-delà de l'ionosphère et contient un mélange d'ions et d'électrons issus de l'ionosphère et du vent solaire. Le champ magnétique terrestre est déformé par le vent solaire (voir figure 1 en annexe). Il se forme ainsi les cornets polaires, région en forme de puits conique qui interrompt la magnétosphère aux pôles. Les cornets polaires ne sont pas isolés du vent solaire par la magnétopause.

Au centre de la queue de la magnétosphère se forme une couche de plasma dont l'épaisseur, la densité et l'énergie varient considérablement. Souvent, ce plasma se meut rapidement en diverses directions, et en particulier vers la Terre.

D) Interaction du vent solaire avec l'ionosphère

Les particules chargées du vent solaire qui entrent dans les cornets polaires interagissent avec les molécules et atomes constitutifs de l'atmosphère en leur transmettant de l'énergie par collision. Alors, un des électrons de la couche de valence de la molécule dite excitée passe dans une couche électronique supérieure. La molécule ou l'atome excité peut alors transmettre son énergie à une autre particule par collision : c'est la désactivation collisionnelle. Cependant, comme la densité des particules est faible dans l'ionosphère du fait de la basse pression et de la haute température, la désactivation collisionnelle est moins fréquente. Avant d'entrer en collision, la molécule perd spontanément cette énergie. L'électron retourne dans sa couche d'origine, et émet un photon : c'est l'émission spontanée (voir figure 2 en annexe). Le flux de particules chargées dans l'ionosphère produit ainsi un spectre d'émission. Le spectre d'émission est spécifique pour chaque élément chimique et est constitué de raies de couleur.

L'azote moléculaire émet très peu de temps après excitation une raie à 391,4 nm (violet) et une raie à 427,8 nm (bleu). Le cas de l'oxygène est plus compliqué. Cet atome peut être à trois niveaux d'énergie différents : 3P (non excité), 1D, 1S (excité). Excité au niveau 1S, l'atome d'oxygène peut dégager son énergie de trois façons. (1) L'atome d'oxygène entre en collision avec une autre particule dans un temps inférieur à 0,9 s après l'excitation. L'atome passe alors directement de 1S à 3P par désactivation collisionnelle et n'émet pas de photon. (2) L'atome d'oxygène ne rencontre pas d'autre particule dans les 0,9 s qui suivent son excitation : il passe alors de 1S à 1D et émet de la lumière verte (557,7 nm). Ensuite il peut passer de 1D à 3P par désactivation collisionnelle. (3) Si l'atome d'oxygène reste au niveau 1D pendant encore 110 s, il passe spontanément de 1D à 3P en émettant dans le rouge (630,0 nm et 636,4 nm).

La pression et la densité des particules diminuent avec l'altitude, c'est pourquoi les chances pour une particule d'entrer en collision avec une autre particule diminuent avec l'altitude. Ainsi pour l'oxygène le 3^e cas se présente dans les plus hautes altitudes (250 km). De même, la raie verte de l'oxygène n'est observable qu'à partir de 100 km d'altitude. En dessous de 100 km, la densité des particules est trop élevée pour que l'on puisse observer les raies d'émission de l'oxygène atomique. C'est pourquoi les aurores polaires sont, de bas en haut, violettes, vertes, puis rouges (voir Figure 3 en annexe).

Les phénomènes physiques à l'origine des aurores polaires terrestres ont été beaucoup étudiés. Kristian Birkeland et d'autres physiciens après lui ont réussi à reproduire des aurores en laboratoire et ont contribué à élucider les phénomènes exposés plus haut. On sait aujourd'hui que les aurores polaires peuvent avoir lieu aussi sur d'autres planètes, à condition que celles-ci possèdent un champ magnétique et une atmosphère. Ainsi, des aurores ont été observées sur Jupiter et Uranus. Nous nous sommes demandés si on peut les simuler ces aurores d'autres planètes expérimentalement. Pour répondre, nous avons d'abord reproduit les aurores polaires terrestres par une approche similaire à celle de Birkeland. Ensuite, nous avons essayé de fabriquer les aurores extraterrestres en utilisant différentes atmosphères sous cloche à vide.

II. L'EXPERIENCE

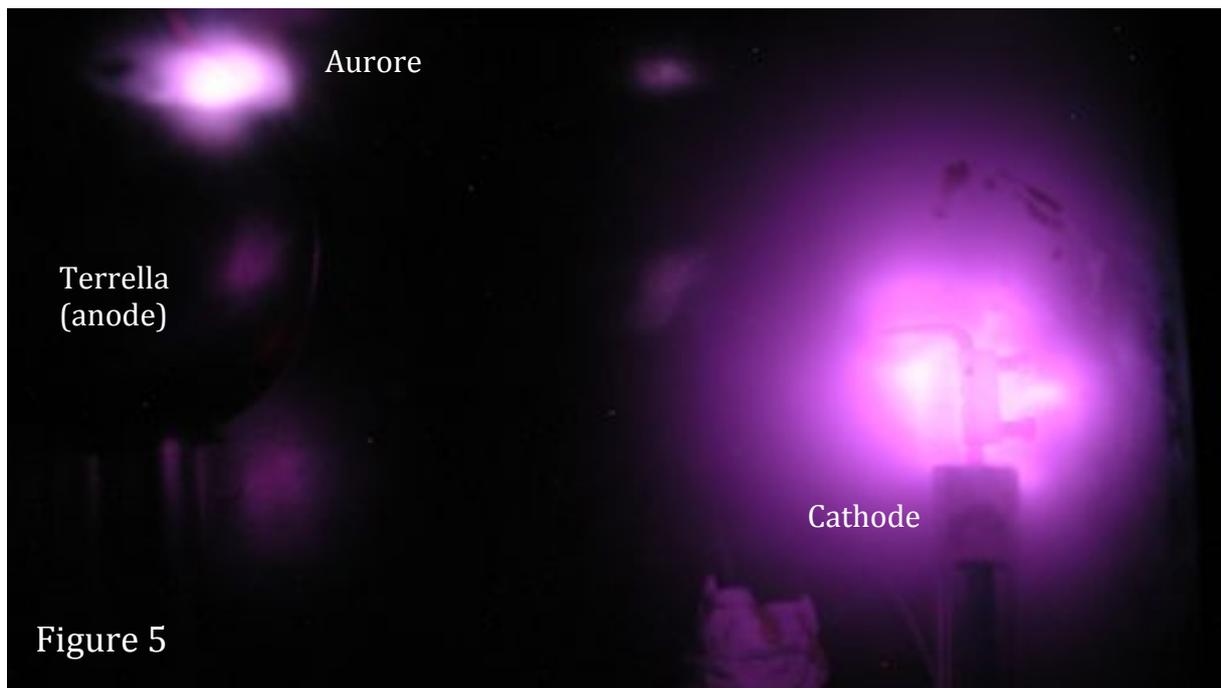
1) Montage

Il est possible de reproduire les aurores polaires en laboratoire avec du matériel relativement simple, bien que ce phénomène soit le résultat d'un processus physique complexe. Même si les conditions physiques exactes et l'échelle ne peuvent pas être respectées, les résultats observables en laboratoire sont qualitativement identiques.

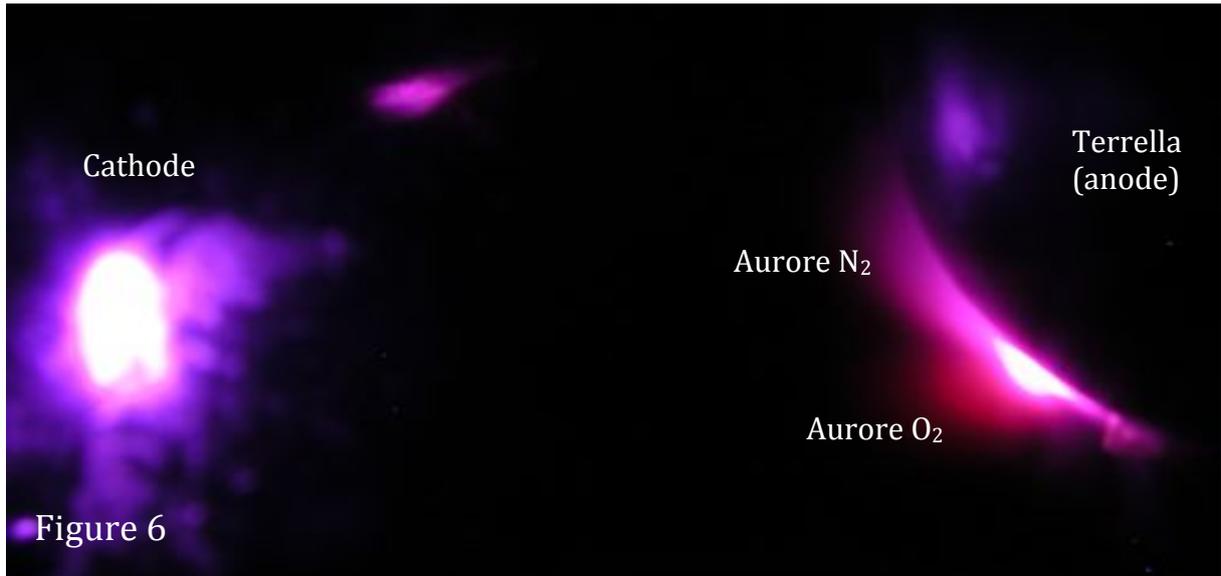
Suivant le montage expérimental de Kristian Birkeland, nous avons représenté la Terre et son champ magnétique par une terrella. Dans notre cas c'est une sphère métallique contenant un aimant droit. L'ionosphère est représentée par de l'air à basse pression. Les conditions de basse pression sont obtenues à l'aide d'une cloche à vide et d'une pompe à vide. Le vent solaire, flux de particules chargées, est représenté par un flux d'électrons. Celui-ci est obtenu en plaçant la terrella à l'anode et en utilisant une cathode métallique en forme de pointe. La terrella doit être placée à l'anode pour collecter les électrons sur la terrella, comme les particules du vent solaire arrivent sur Terre. Un générateur à haute tension débite un courant continu. Le flux d'électrons remplace le vent solaire qui est composé en grande partie d'électrons. Une basse pression est importante car elle permet le passage d'un courant électrique et l'apparition d'un spectre d'émission. La manipulation sera faite dans le noir, afin de diminuer les effets lumineux perturbateurs, extérieurs à l'expérience. Ceci facilitera l'observation ainsi que les mesures du spectromètre. La figure 4 (en annexe) montre le schéma du montage, les spécifications techniques et les aspects de sécurité sont en annexes dans la partie matériel et méthodes.

2) Premier essai

Avec ce montage, nous avons établi un vide ($P = 50 \text{ Pa}$) puis fait progressivement monter la tension du générateur. Apparaît alors de la lumière violette, plus forte au niveau de la cathode et autour des pôles magnétiques de la terrella (Figure 5). Ces lueurs situées aux pôles ressemblent fortement aux aurores polaires, par leur couleur et leur forme. L'analyse spectrale (non incluse) montre qu'il s'agit du spectre d'émission du diazote, gaz majoritaire de l'air.



La prise de vue au niveau de l'horizon de la terrella montre que ces aurores artificielles modélisent bien les aurores naturelles (Figure 6). Il est à noter ici que le rouge du spectre d'émission du dioxygène s'ajoute au violet du diazote lorsqu'on utilise de l'air. Par contre, le spectre d'émission de l'oxygène atomique ne peut pas être reproduit car il faudrait une pression encore plus basse (de l'ordre de 10^{-4} Pa).



3) La trajectoire des électrons

Pour mieux comprendre la trajectoire des électrons dans notre montage, nous avons eu recours au calcul et à l'expérience utilisant les bobines de Helmholtz.

A) Méthode calculatoire

Les électrons dans la cloche sont soumis au champ magnétique de l'aimant et au champ électrique. Nous allons déterminer le mouvement d'un électron (de charge $-e$; $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C) en première approche en considérant le champ électromagnétique comme constant et uniforme.

L'électron se déplace dans un repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ orthonormé direct. L'électron de charge $-e$ est soumis à deux forces :

Une force magnétique : $\vec{F}_{mag} = -e\vec{v} \wedge \vec{B}$ où \vec{v} est la vitesse de l'électron et \vec{B} le champ magnétique.

Une force électrique : $\vec{F}_{el} = -e\vec{E}$ où \vec{E} est le champ électrique.

\vec{B} et \vec{E} sont quelconques, et on peut écrire :

$$\vec{B} = B_x\vec{i} + B_y\vec{j} + B_z\vec{k} \text{ et } \vec{E} = E_x\vec{i} + E_y\vec{j} + E_z\vec{k}$$

À un instant t quelconque, l'électron se trouve au point M_t et on a $\vec{v} = \frac{d\vec{OM}_t}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$ où x, y, z sont les coordonnées de l'électron dans le repère.

D'après le principe fondamental de la dynamique appliqué à l'électron :

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_{mag} = (-e\vec{E}) + (-e\vec{v} \wedge \vec{B}) = -e(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Or $\vec{v} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$ d'où $\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\vec{k}$, et donc

$$\begin{aligned} m\left[\frac{d^2x}{dt^2}\vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\vec{k}\right] &= -e\left[E_x\vec{i} + E_y\vec{j} + E_z\vec{k} + \left(\frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}\right) \wedge (B_x\vec{i} + B_y\vec{j} + B_z\vec{k})\right] \\ &= -e\left[E_x\vec{i} + E_y\vec{j} + E_z\vec{k} + \frac{dx}{dt}B_y\vec{k} - \frac{dx}{dt}B_z\vec{j} - \frac{dy}{dt}B_x\vec{k} + \frac{dy}{dt}B_z\vec{i} + \frac{dz}{dt}B_x\vec{j} - \frac{dz}{dt}B_y\vec{i}\right] \\ &= -e\left[\left(E_x + \frac{dy}{dt}B_z - \frac{dz}{dt}B_y\right)\vec{i} + \left(E_y + \frac{dz}{dt}B_x - \frac{dx}{dt}B_z\right)\vec{j} + \left(E_z + \frac{dx}{dt}B_y - \frac{dy}{dt}B_x\right)\vec{k}\right] \end{aligned}$$

D'après l'unicité des composantes d'un vecteur dans une base donnée, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -e \left(E_x + \frac{dy}{dt} B_z - \frac{dz}{dt} B_y \right) \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = -e \left(E_y + \frac{dz}{dt} B_x - \frac{dx}{dt} B_z \right) \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = -e \left(E_z + \frac{dx}{dt} B_y - \frac{dy}{dt} B_x \right) \end{cases}$$

Ces équations différentielles donnent, après résolution, les équations paramétrées de $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$. Celles-ci montrent que les électrons suivent les lignes de champ magnétique et tournent autour des lignes de champ électrique, d'où la forme hélicoïdale de la trajectoire. Celle-ci peut être mise en évidence par l'expérience utilisant les bobines de Helmholtz.

B) Expérience de Helmholtz

L'expérience classique des bobines de Helmholtz met en évidence le trajet des électrons dans le champ magnétique. On utilise le matériel suivant une ampoule en verre contenant de la vapeur de mercure (Hg). Un canon à électrons est inséré dans une des branches de l'ampoule. L'ensemble est placé entre deux bobines de Helmholtz alimentées par un générateur basse tension (voir Figure 7).

Un champ magnétique B uniforme est créé dans le volume entre les deux bobines de Helmholtz. Le canon à électrons émet à l'intérieur de l'ampoule un faisceau d'électrons homocinétiques, dans une direction donnée. Les vapeurs de mercure permettent alors de visualiser la trajectoire des électrons soumis au champ magnétique B .

Dans notre étude, le système {électron} n'est soumis qu'à la force de Lorentz :

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$$

En effet le poids du système et les forces de frottement fluide de l'air sont négligeables face à F . L'expression de F montre que la force de Lorentz est perpendiculaire au champ magnétique et au déplacement du flux d'électrons.

On s'attend à des trajectoires différentes selon l'inclinaison du courant particulaire initial (de vecteur directeur v_0) par rapport au champ magnétique. La situation qui nous intéresse correspond à une direction initiale du faisceau d'électrons non parallèle à la direction du champ magnétique. En effet, le flux d'électrons issu de la cathode arrive sur la sphère comme indiqué en Figure 8.



Figure 7. Montage expérimental

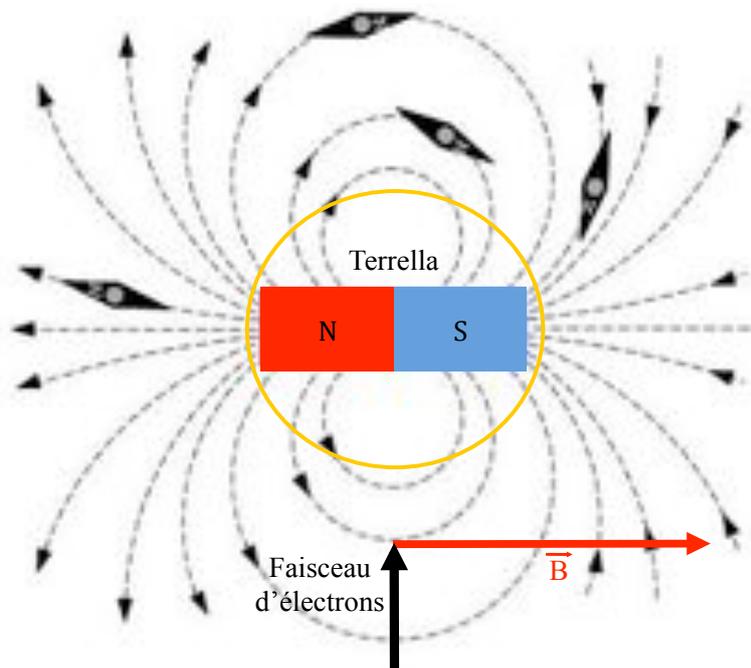
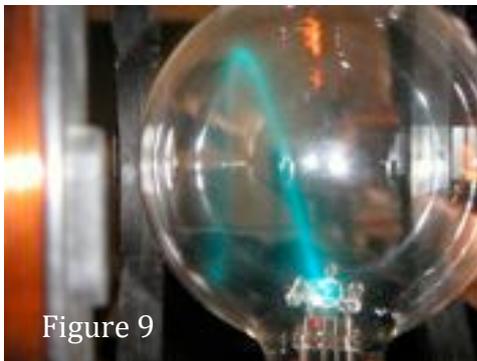


Figure 8. Schéma de l'arrivée des électrons issus de la cathode (vue du dessus)

Si on fait pivoter l'ampoule aléatoirement pour modifier les directions de B et v_0 de telle sorte que leur orientation soit quelconque, on obtient dans chaque cas une trajectoire hélicoïdale. Le flux d'électron est dévié et semble s'enrouler autour des lignes de champ magnétique (Figure 9).



Dans notre montage avec la terrella, le faisceau d'électrons issu de la cathode, qui intersecte les lignes de champ magnétique de l'aimant en néodyme-fer-bore, possède une direction aléatoire, que l'on ne peut contrôler. Le champ B créé par l'aimant n'est pas uniforme. Ainsi dans notre montage, v_0 et B ont des directions quelconques. On en déduit que les électrons issus de la cathode adoptent une trajectoire hélicoïdale. Les électrons suivent les lignes de champ magnétique de l'aimant, qui les précipitent vers les pôles de la sphère, tandis qu'ils tournent autour de ces lignes. D'où une trajectoire torsadée. Leur trajectoire les mène donc jusqu'aux pôles magnétiques, où ils s'accablent au niveau des cornets polaires.

4) Influence de différents paramètres

A) Tension électrique

Pour connaître l'influence de la tension électrique sur l'intensité lumineuse de l'aurore, nous avons fait varier la tension tout en gardant une distance entre cathode et anode de 10,5 cm et

une pression de 50 Pa. Les photographies suivantes sont obtenues avec à chaque fois le même temps d'exposition (30 s) (Figure 10).

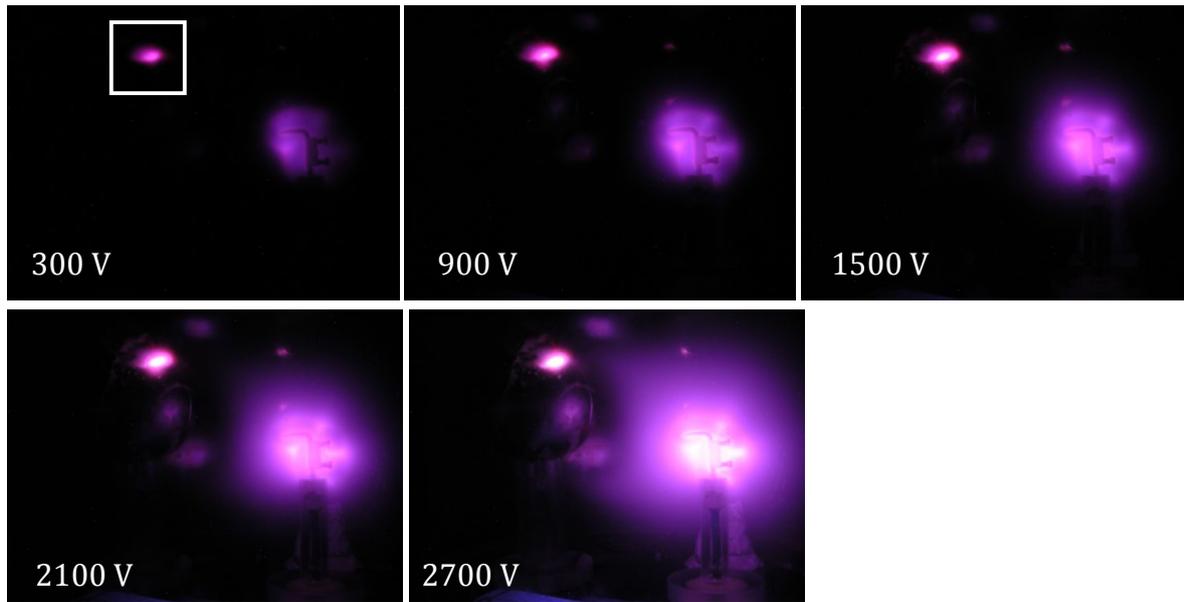


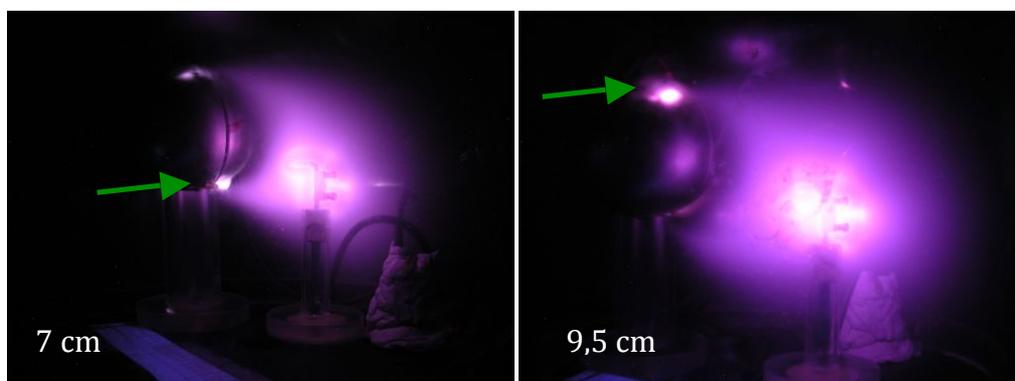
Figure 10. Intensité de l'aurore (cadre blanc) en fonction de la tension.

Avec ces images, il est évident que la luminosité augmente avec la tension. Ceci est également vrai pour la lumière émise au niveau de la cathode (à droite). Nous avons confirmé ce résultat à l'aide d'un spectromètre (tableau ci-dessous), bien que la faible intensité de la lumière ne permette pas de faire des mesures très précises.

Tension (V)	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700
Intensité lumineuse (u.a.)	7	12	9	13	16	18	23	23	25

B) Distance cathode-anode

Pour connaître l'impact de la distance cathode-anode sur la qualité des aurores, nous avons fait varier cette distance entre 7 et 14 cm, tout en gardant une tension de 2700 V et une pression constante de 50 Pa. On remarque que la distance entre cathode et anode n'a pas d'influence importante sur la luminosité de l'aurore (flèche verte). Une courte distance permet de mieux voir la déviation des électrons, mais une distance trop courte entraîne la formation d'un arc électrique. Une distance de 10 cm est optimale.



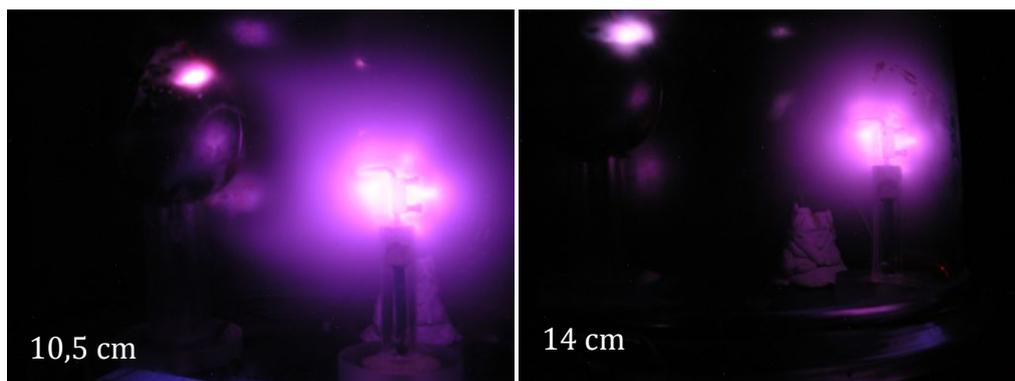


Figure 11. Qualité de l'aurore en fonction de la distance cathode-anode.

C) Pression sous la cloche

La faible pression sous la cloche est un élément essentiel dans la réalisation de cette expérience. Nous avons remarqué qu'avec une pression supérieure à 10 hPa, aucun phénomène lumineux n'est visible, quelle que soit la distance entre cathode et anode. En dessous de 10 hPa, le phénomène lumineux est observable mais ne gagne pas sensiblement en intensité entre 10 hPa et 50 Pa. Nous avons ensuite travaillé avec une pression sous la cloche de 50 Pa.

D) Champ magnétique

Le champ magnétique est un élément *sine qua non* pour produire des aurores expérimentales. Nous avons testé cela en retirant l'aimant de la terrella. Cette expérience a été réalisée avec une distance de 10 cm entre cathode et anode, une tension de 2700 V et une pression de 50 Pa. Il en résulte que sans aimant, aucune aurore n'est visible (voir Figure 12).

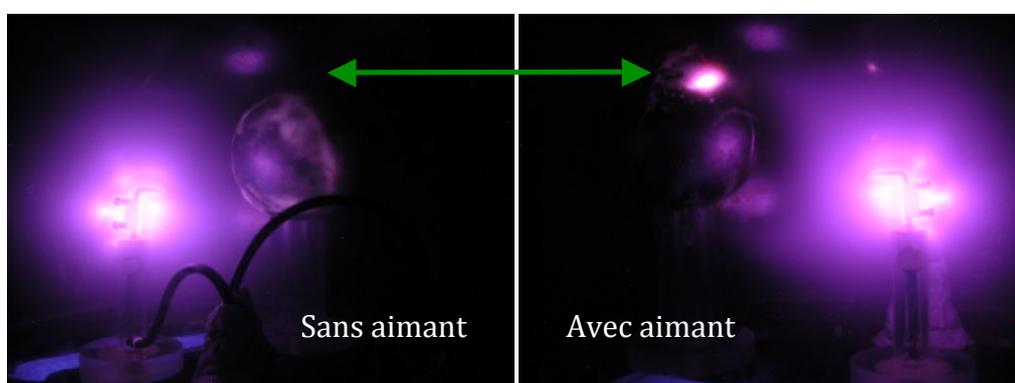


Figure 12.

L'orientation du champ magnétique joue aussi un rôle clé dans la localisation du phénomène lumineux. En effet, les électrons sont déviés vers les pôles magnétiques de la terrella. Ce phénomène peut être observé sur la Figure 13.

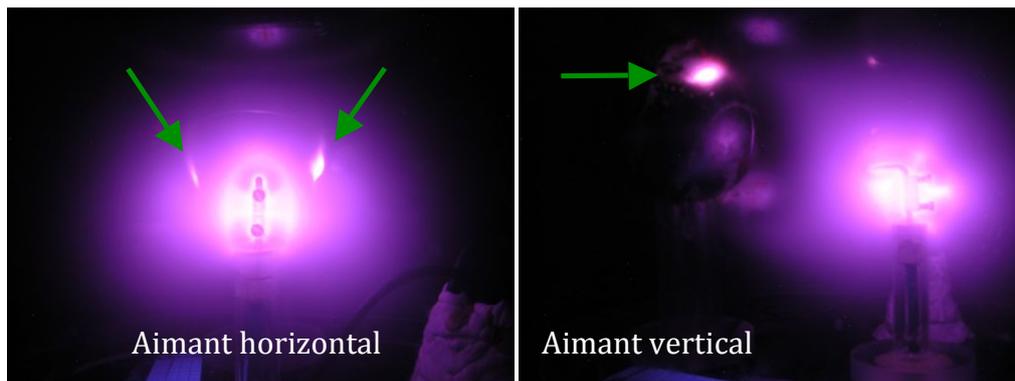


Figure 13.

5) Aurores dans des atmosphères de N_2 , O_2 , H_2 et CO_2

L'un de nos objectifs principaux était de produire des aurores « extraterrestres » en introduisant différents gaz sous la cloche. Il suffit à une planète d'être pourvue d'un champ magnétique, d'une atmosphère quelconque et de recevoir du vent solaire pour que s'y manifestent des aurores polaires. En effet, Jupiter, Saturne, Uranus, Mars et Vénus possèdent leurs propres aurores polaires. Or les atmosphères de ces planètes ne sont pas constituées comme celle de la Terre. Jupiter, Saturne et Uranus possèdent une atmosphère de dihydrogène, et Mars et Vénus possèdent une atmosphère de dioxyde de carbone. Pour reproduire ces aurores-là, nous avons introduit des gaz purs dans notre montage expérimental.

Ceci pose certaines difficultés expérimentales. Nous avons construit un port pour injecter les gaz sous la cloche. Ce port est un tuyau muni à l'une de ses extrémités d'un joint en silicone formant un cul-de-sac. Ce joint en silicone est étanche et ne perd pas son étanchéité même s'il est piqué à répétition par une aiguille de seringue. Ce tuyau est relié à l'intérieur de la cloche via l'une des ouvertures du plateau. En un point de ce tuyau, il y a un robinet permettant de mettre en communication l'extérieur avec l'intérieur de la cloche (ceci sert à casser le vide de la cloche), ou bien le joint en silicone et l'intérieur de la cloche, ou bien de couper le passage (voir Figure 14, en annexe).

Pour injecter un gaz, on prépare plusieurs seringues de 50 mL pleines du gaz que l'on souhaite introduire, à pression atmosphérique. On coupe le passage entre intérieur de la cloche et pompe à vide et le passage entre cloche et joint en silicone à l'aide du robinet. On introduit en biais l'aiguille de la seringue dans le joint en silicone. Puis on ouvre le passage entre intérieur de la cloche et joint en silicone. La différence de pression aspire le gaz de la seringue et le fait passer sous la cloche. On coupe ensuite le passage entre joint et cloche et on retire la seringue. Le processus doit être réitéré plusieurs fois afin de laver l'intérieur de la cloche et d'obtenir une atmosphère entièrement constituée du gaz souhaité.

A) N_2

Le diazote est le gaz majoritaire dans l'atmosphère terrestre (78%). Pour avoir une aurore uniquement à base de diazote, nous avons remplacé l'air de la cloche par du diazote pur. Ceci produit une aurore très similaire à celle obtenue avec de l'air, documentée en Figure 15. Nous avons essayé de faire des mesures au spectrographe, et effectivement certaines bandes détectées coïncident avec le spectre d'émission du diazote. Cependant, pour l'instant, la faible luminosité pose un obstacle. Nous essayons de répéter cette expérience avec un spectromètre de plus grande sensibilité.

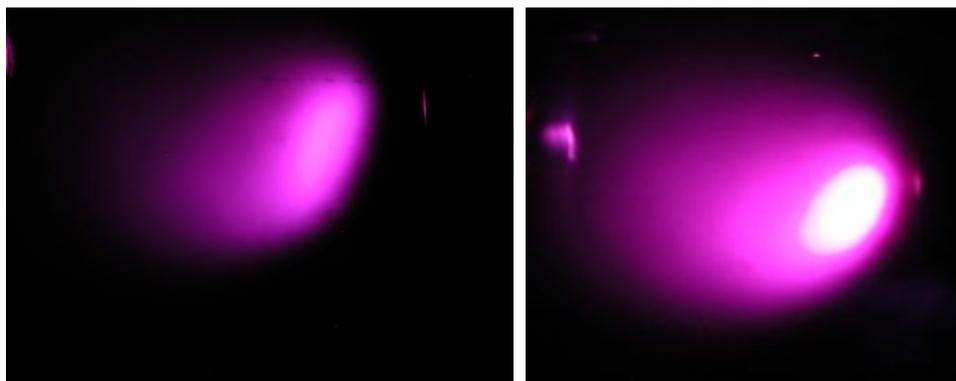


Figure 15. Aurore au N₂

B) O₂

Avec 21% en volume, le dioxygène est le second gaz le plus important de l'atmosphère. On sait que sous sa forme atomique, l'oxygène contribue aux aurores polaires. Cependant, on ne sait pas ce qui se produit lorsque toute l'atmosphère est constituée de dioxygène. Nous avons injecté du dioxygène pur sous la cloche et nous avons obtenu les résultats présentés en Figure 16. En répétant l'expérience à plusieurs reprises, nous avons observé une lumière violet-rouge.

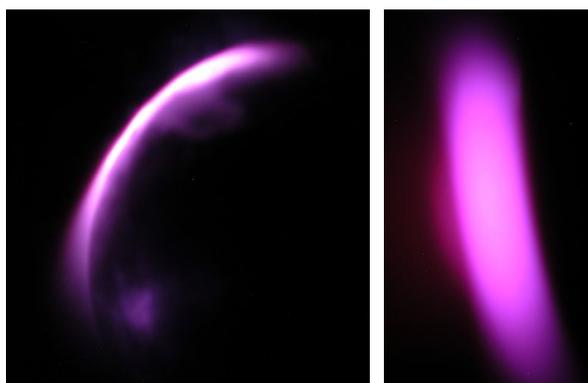


Figure 16. Aurore au O₂

C) H₂

Le dihydrogène est très peu présent dans l'atmosphère terrestre car il réagit fortement avec le dioxygène. Sur d'autres planètes comme Jupiter, Uranus et Neptune, ce gaz constitue plus de 80% de l'atmosphère. C'est pourquoi il est à prendre en compte lors de l'étude des aurores extraterrestres. Nous avons donc injecté du dihydrogène pur sous la cloche après l'avoir lavé avec du dioxyde de carbone pur (voir chapitre sécurité en annexe). On obtient un violet bien plus pâle qu'avec l'air ou le diazote. Ici le spectre de raies obtenu (non montré) se recoupe avec le spectre connu du dihydrogène.

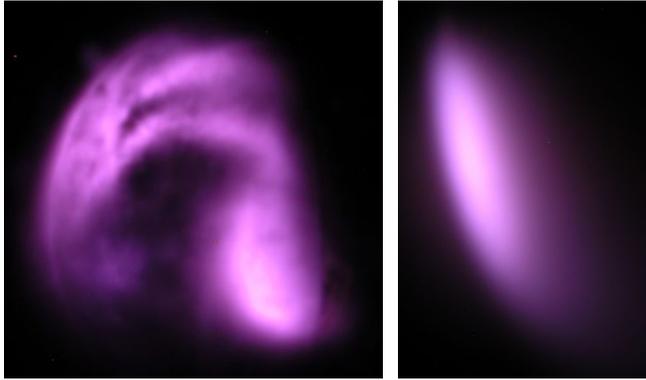


Figure 17. Aurore au H₂

D) CO₂

Sur Mars et Vénus, le dioxyde de carbone est le gaz majoritaire dans l'atmosphère. En effet, il en constitue plus de 95 % en volume. Nous avons introduit ce gaz sous la cloche et nous avons obtenu des aurores de formes typiques mais de couleur très différentes des précédentes, montrées en figure 18. La lumière est ici plutôt constituée d'un spectre d'émission continu qui donne une lumière presque blanche. Cependant le spectre d'émission du dioxyde de carbone se situe essentiellement dans les infrarouges. Ce résultat mérite une recherche plus approfondie.



Figure 18. Aurores au CO₂

5) Inversion cathode/anode

Afin d'exploiter davantage notre montage, nous avons mis la sphère à la cathode et la pointe à l'anode. On obtient alors les résultats de la Figure 19 à 22. Les électrons sortent de la sphère et, déviés par le champ magnétique, se mettent à tourner autour de l'équateur magnétique, excitant le gaz sur leur passage.



Figure 19. Vue de la terrella lors d'une inversion cathode-anode en atmosphère terrestre.

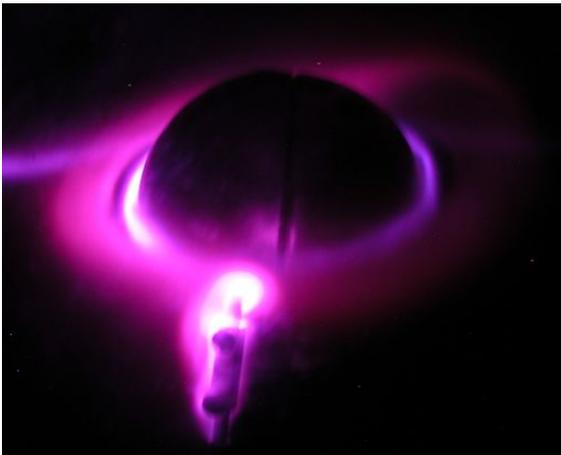


Figure 20. Inversion cathode-anode à l'atmosphère terrestre. On voit ici la lumière rouge émise par le dioxygène, en plus du violet émis par le diazote.

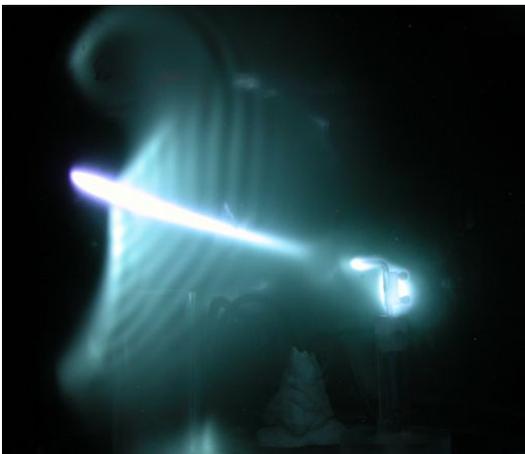


Figure 21. Inversion cathode-anode au CO₂. À comparer avec la Figure 18.

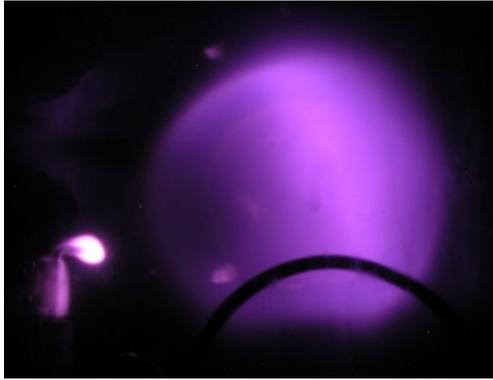


Figure 21. Inversion cathode-anode sans champ magnétique. À titre de contrôle, ce montage montre qu'en l'absence de champ magnétique, il n'y a pas d'anneau de courant.

III. CONCLUSION

Cette expérience est assez délicate à mettre en œuvre, mais après de nombreux essais, parfois infructueux, parfois décalés par rapport au résultat attendu, nous avons atteint notre but. Nous avons mis en œuvre une démarche expérimentale qui nous a permis d'améliorer progressivement et sûrement notre travail. Nous avons progressivement amélioré notre montage expérimental en tenant compte de nos résultats et des conseils de Jean Lilensten, chercheur au CNRS travaillant sur le sujet des aurores polaires. D'une part, nous avons réussi à reproduire une aurore polaire en laboratoire. D'autre part, l'injection de différents gaz sous la cloche a fonctionné, donnant des résultats tout à fait intéressants. Ce point peut encore être approfondi avec de nouveaux gaz, mais il ne nous était pas possible de tout expérimenter. Il faudra en outre tenter d'améliorer et d'approfondir l'analyse spectrale.

En effet, les résultats de la spectrographie sont légèrement décalés par rapport aux résultats attendus. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'une réaction a lieu sous l'influence du flux d'électrons (une ionisation des gaz, par exemple). Dans un contexte d'astrophysique, puisque la lumière des aurores est le résultat d'une émission spontanée, il est possible, à partir d'une analyse spectrale, de déterminer la composition de l'atmosphère dans laquelle a lieu cette aurore. L'analyse spectrale des aurores extraterrestres permettrait ainsi de déterminer l'atmosphère d'autres planètes. Dans la pratique, le problème qui se pose est de capter la lumière de ces aurores qui demeure relativement faible par rapport à la lumière réfléchiée par les planètes.

Ce projet a été extrêmement enrichissant pour nous quatre. Nous avons fait l'expérience d'une équipe soudée. Nous avons acquis des connaissances d'un domaine complexe et de grande actualité (entre autres physique des plasmas, météorologie de l'espace). Certaines rencontres nous ont passionné et nous ont permis de nous échanger avec un chercheur enthousiaste et très actif dans ce domaine, Jean Lilensten, chercheur au CNRS, avec qui nous partageons maintenant la même passion pour les aurores.

REMERCIEMENTS

Nous remercions pour leur soutien et leur disponibilité :

Monsieur BOTTINEAU et le personnel des laboratoires du Lycée Louis le Grand

<http://www.louis-le-grand.org/albedo/index.php>

Nos professeurs référents Monsieur FAYE et Madame GOURGEOT

Monsieur Jean LILENSTEN, chercheur au laboratoire de planétologie de Grenoble (CNRS)

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

Monsieur Arnaud BULTEL, Maître de Conférences à l'Université de Rouen

<http://www.coria.fr/spip.php?auteur9>

BIBLIOGRAPHIE

Aurores boréales et australes, Fehrenbach, Dawidowicz, Marion/Poles d'Images 2001

Les aurores boréales, Québec-Nunavik, Gilles Boutin/Grand Format

Les Aurores boréales, Candace Savage/Treccarri 1994

Les aurores boréales ou les Lumières mystérieuses, Candace Savage/ Treccarri 2002

Revue (*Pour la science, Science et Vie*) empruntées au CDI du Lycée

Sur les aurores polaires

http://fr.wikipedia.org/wiki/Aurore_polaire

<http://tpeaurorespolaire2009.e-monsite.com/rubrique,-,468506,1.html>

<http://www.thecanadianencyclopedia.com/index.cfm?PgNm=TCE&Params=f1ARTf0005809>

<http://www-spod.gsfc.nasa.gov/Education/Fwms2.html>

<http://www.cnrs.fr/>

http://www.interet-general.info/article.php3?id_article=10021

http://image.gsfc.nasa.gov/publication/document/sr_rev_2005/2005_image_senior_review.pdf

<http://www.astrosurf.com/quasar95/exposes/aurores-polaires.pdf>

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

Sur la trajectoire des électrons dans un champ magnétique

<http://perso.fundp.ac.be/~rmairess/em/pdf/em.pdf>

Sur la magnétosphère

http://www.luth.obspm.fr/~luthier/mottez/intro_physique_spatiale/concepts/magnetosphere/regions.html

<http://www-spod.gsfc.nasa.gov/Education/Fwmpause.html>

Sur le magnétisme solaire

<http://www.astrosurf.com/luxorion/sysol-soleil-zurich.htm>

IV. ANNEXES

1) Matériel et méthodes

Liste du matériel

Pour réaliser l'expérience, nous disposons du matériel suivant :

Cloche à vide. Le support est recouvert d'un tapis en caoutchouc pour éviter les fuites. Les surfaces de contact entre cloche et tapis puis tapis et support sont recouvertes de silicone pour rendre l'assemblage étanche. Les pieds du support sont insérés dans des pieds en caoutchouc afin de l'isoler électriquement.

Pompe à vide. Celle ci est reliée au plateau via un tuyau à vide en caoutchouc et permet de réaliser un vide primaire sous la cloche. La pression est mesurée à l'aide d'un pressiomètre (0-2000 hPa). La valeur minimale de pression atteinte est de l'ordre de 50 Pa.

Générateur de courant continu à haute tension. La tension du courant débité est réglable et peut être définie entre 0 V et 3000 V. Dans les conditions de notre montage, l'intensité du courant se situe entre 100 mA et 1000 mA. Le générateur est muni d'un fusible supportant jusqu'à 1 A.

Sphère creuse en laiton. Le diamètre est de 85 mm et l'épaisseur de la paroi de l'ordre de 3 mm. L'intérieur de cette sphère est recouvert de chatteringon afin d'isoler électriquement l'aimant qui se trouve à l'intérieur. La sphère a un trou pour faire entrer l'aimant.

Aimant en néodyme-fer-bore. Nous utilisons un aimant d'environ 6 cm de longueur et 3 cm de diamètre. La valeur du champ magnétique est de l'ordre de 1 T.

Pointe en acier (cathode).

Câbles électriques haute tension avec fiches banane.

Patafix (isolant électrique).

Supports en plexiglas. L'utilisation du plexiglas évite les interférences magnétiques et électriques causées par la présence de métal.

Spectromètre à fibre optique. Nous avons utilisé un SpectroVio de Dida Concept, avec une gamme spectrale de 370 nm à 900 nm en résolution 2 nm. Il est équipé d'un détecteur CCD linéaire 2048 pixels. L'acquisition se fait par USB 2.0.

Gaz. Nous avons utilisé du dihydrogène (H_2), du dioxygène (O_2), du dioxyde de carbone (CO_2) et du diazote (N_2) dans une pureté supérieure à 99%.

Documentation photographique. Nous avons utilisé un appareil photo Nikon Coolpix 5700 en manuel avec un temps d'exposition de 30 s et une ouverture de 8.0.

2) Sécurité

Électricité. Les câbles électriques utilisés sont des câbles haute tension. Les pieds du support de la cloche sont insérés dans des bouchons en caoutchouc, afin d'isoler électriquement le dispositif. Pendant l'expérience, le support peut se charger électriquement. Comme mesure de sécurité additionnelle, lorsque le générateur est allumé, on ne touche plus ni au support ni à la cloche. Il n'est pas possible de relier le support à la masse du générateur : en effet, on risque de court-circuiter l'anode avec la masse du générateur.

Gaz. Les quantités de gaz manipulées de l'ordre du centième de mole (environ 200 mL). Le diazote et le dioxyde carbone ne réagissent pas avec les gaz de l'atmosphère. Seuls le dihydrogène et le dioxygène présentent un danger. Nous avons pris la précaution de ne jamais permettre que ces gaz se mélangent lors des injections successives sous la cloche. De plus, la forte dilution des gaz sous la cloche prévient tout danger lié à la réactivité de ces gaz.

3) Figures

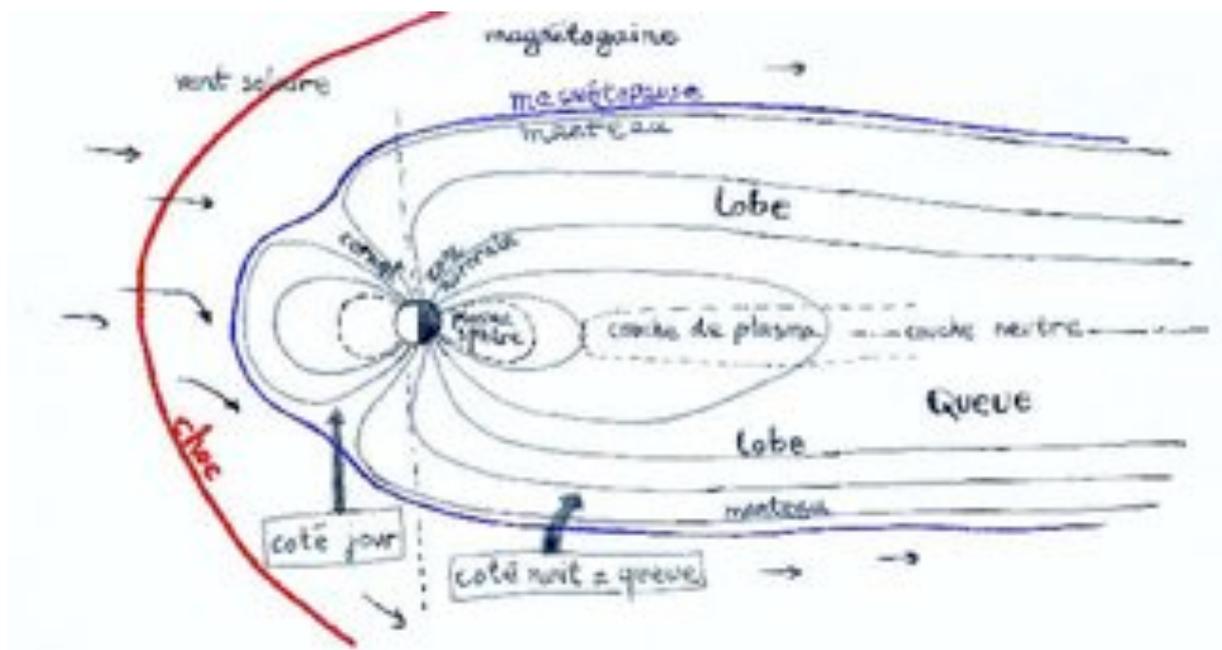
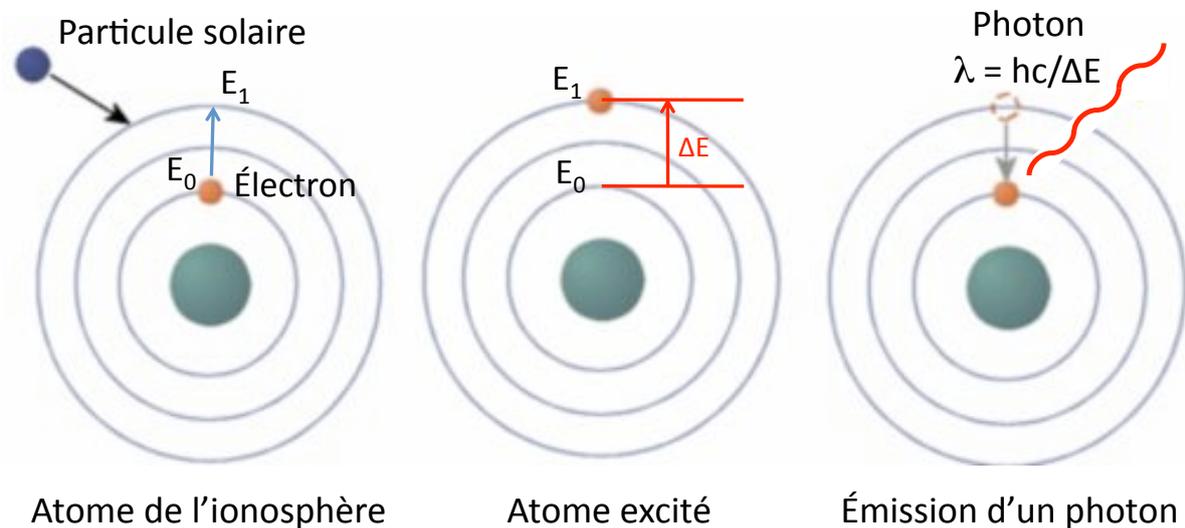


Figure 1. Forme de la magnétosphère terrestre. La magnétosphère agit comme un écran et protège la surface terrestre du vent solaire. Le vent solaire épouse les lignes de champ magnétique terrestre. Il comprime le nez de la magnétosphère, et la pression qu'il exerce sur le côté nocturne entraîne la formation d'une queue allongée.



E_0 et E_1 désignent des énergies.

Figure 2. Mécanisme de l'émission spontanée.

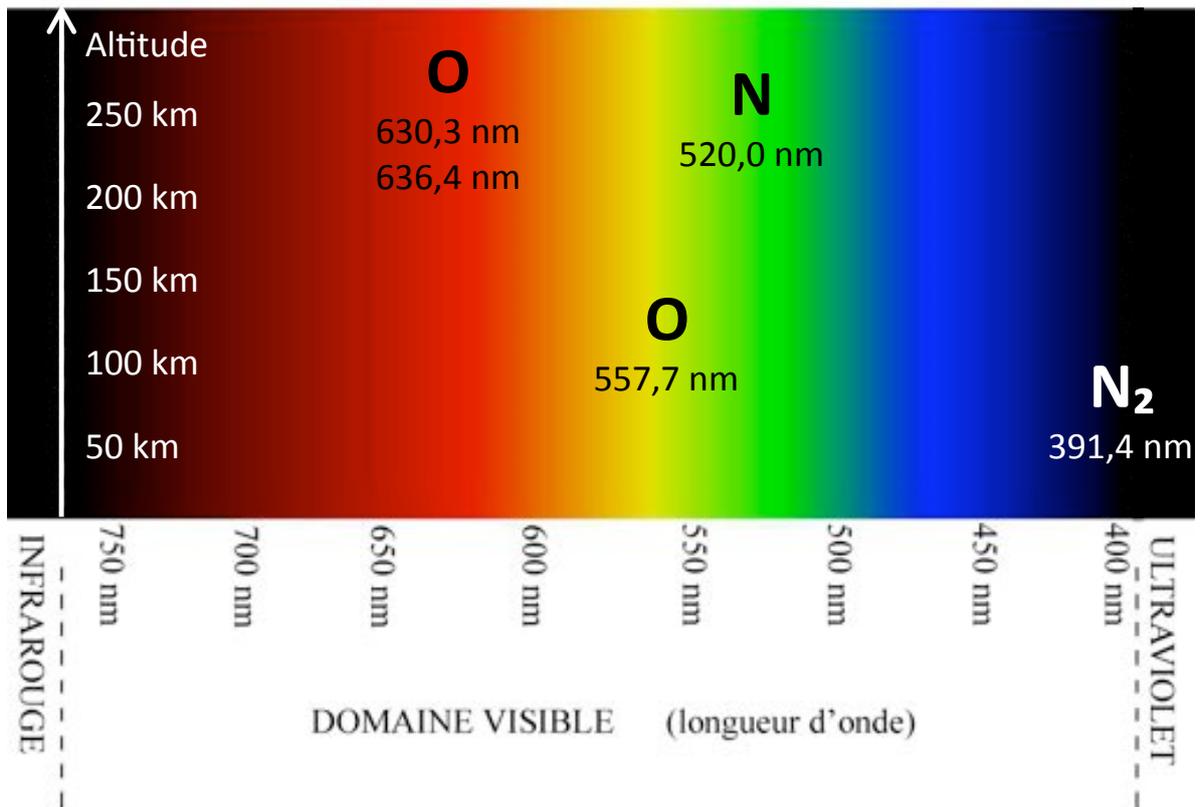


Figure 3. Diagramme des principales émissions lumineuses visibles lors d'une aurore polaire et des atomes et molécules impliqués.

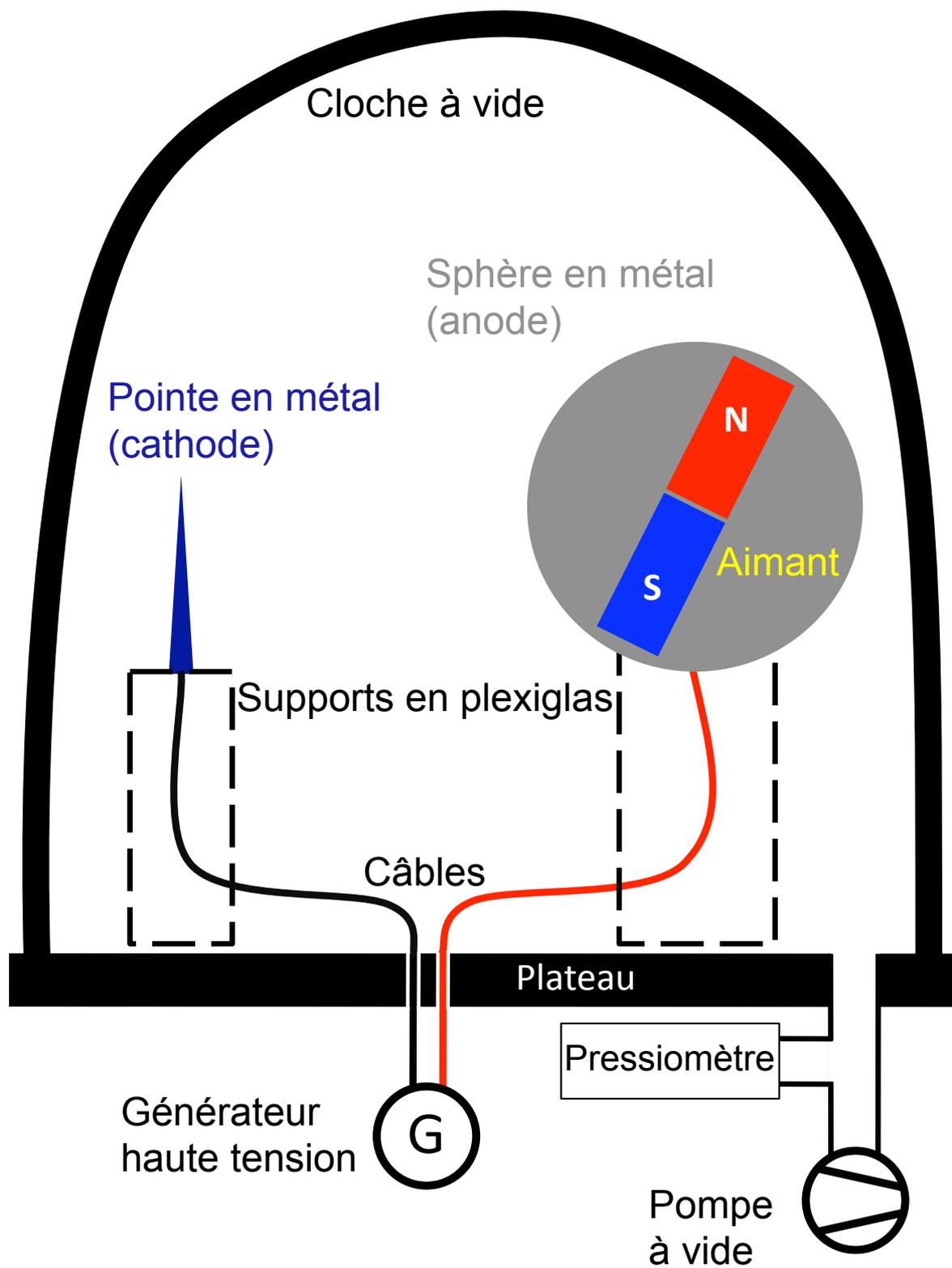


Figure 4. Schéma du montage expérimental.

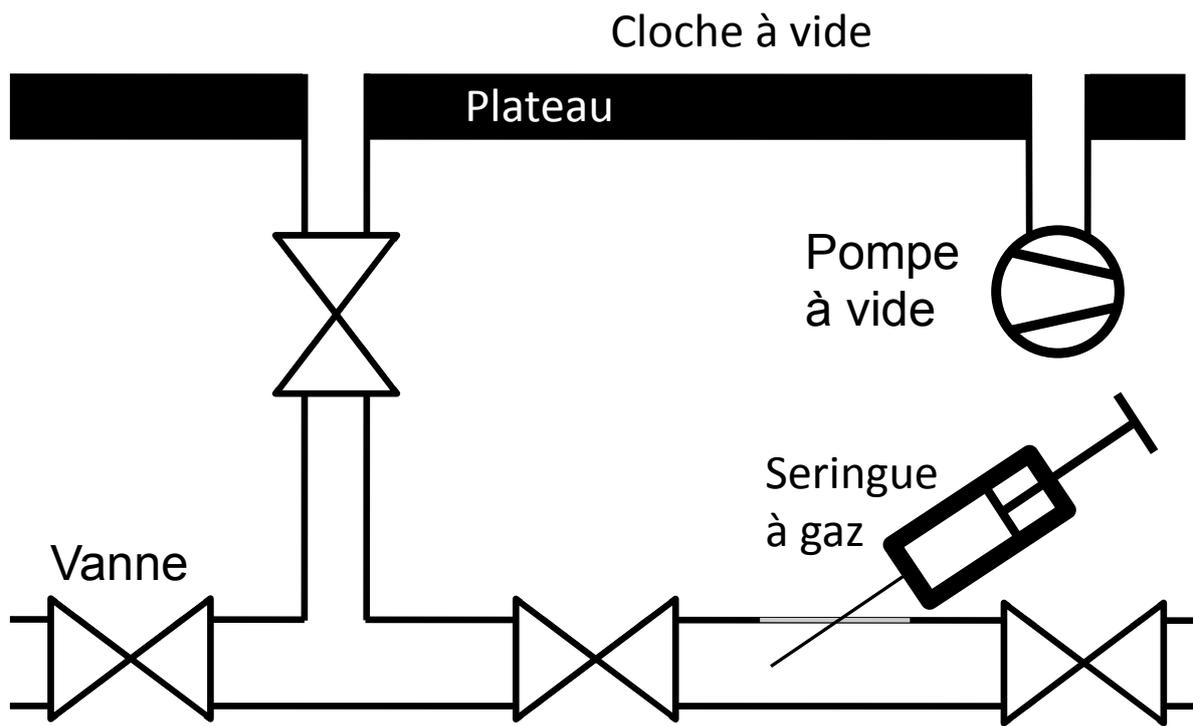


Figure 14. Schéma du dispositif d'injection des gaz.