

Histoire de l'étude scientifique des aurores polaires

31/01/2018

Auteur(s) :

David Bernard

IUT du Limousin

Publié par :

Delphine Chareyron

Olivier Dequinsey

Résumé

Cet article présente l'histoire de l'étude scientifique des aurores polaires (d'abord boréales puis australes), les principes physiques à l'œuvre, et finalement un dispositif expérimental, la Planeterrella, permettant de simuler de tels phénomènes électromagnétiques.

Table des matières

- [Introduction](#)
- [Histoire de la découverte des aurores](#)
 - [Les premières mentions et les premières cartes](#)
 - [Les travaux de Kristian Birkeland](#)
- [La physique des aurores polaires](#)
 - [La structure du Soleil](#)
 - [Accélération des particules : le rôle de la magnétosphère terrestre](#)
 - [Formes et couleurs des aurores](#)
- [La Planeterrella : simulateur d'aurores boréales](#)

Introduction

Quiconque a vu un jour (ou plutôt une nuit) une aurore boréale en garde un souvenir impérissable. Ces grandes draperies colorées (principalement vertes et rouges), tantôt figées, tantôt ondulantes et mouvantes, fascinent tant par leur beauté que par l'imaginaire qu'elles charrient. Les aurores étaient déjà connues des peuples vivant près du cercle polaire arctique, notamment les Inuits et les Vikings, pour lesquels elles étaient reliées aux guerrières Valkyries.

Dans cet article, nous retracerons brièvement l'histoire de l'étude scientifique des aurores polaires. Puis nous nous intéresserons aux phénomènes physiques à l'œuvre, avant de présenter un dispositif expérimental permettant de simuler des aurores polaires.

Histoire de la découverte des aurores

Les premières mentions et les premières cartes

Une des premières mentions du terme « *aurore boréale* » remonte à une correspondance de Galilée datant de 1620.

Les scientifiques de l'époque commencent à s'intéresser au phénomène, mais les lacunes théoriques de la physique ne permettent pas de l'aborder sereinement. Il faut attendre les progrès du XVIII^e siècle, en particulier en optique et dans les domaines du magnétisme et de l'électricité pour commencer à apporter des éléments d'analyse satisfaisants.

En 1820, Jean-Baptiste Biot analyse la lumière des aurores et démontre qu'elle n'est pas polarisée. Or, on sait à cette époque que tous les phénomènes lumineux atmosphériques (que l'on regroupe sous le terme de « *météores* »), basés sur des phénomènes purement optiques tels que la réfraction, la diffusion ou la réflexion induisent un certain degré de polarisation. La découverte de Biot permet donc d'exclure une origine purement optique comme mécanisme de formation des aurores.

La fin du XIX^e siècle voit se développer les missions scientifiques à destination des pôles, tant pour des raisons scientifiques que politiques (les pôles étant considérés comme des points stratégiques dans le développement militaire). En 1860, Elias Loomis, un météorologue américain de l'université de Yale publie la première carte connue de fréquence d'apparition des aurores boréales (figure 1).

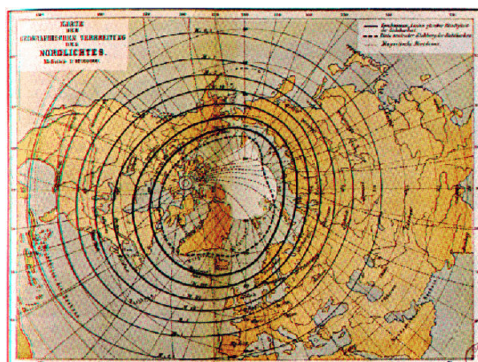


Source - © 1860 E. Loomis / www.phy6.org

Figure 1. Carte de la fréquence d'apparition des aurores boréales établie par Elias Loomis.

La bande sombre correspond à une fréquence d'au moins 80 aurores par an.

Cette première carte est complétée quelques années plus tard (1881) par la carte du géologue allemand Hermann Fritz, dont le décompte est beaucoup plus précis et plus documenté, s'étendant notamment sur une période de relevés plus longue (figure 2).



Source - © 1881 H. Fritz / www.phy6.org

Figure 2. Carte de la fréquence d'apparition des aurores boréales établie par Hermann Fritz.

La première ligne correspond à une fréquence d'au moins 100 aurores par an.

Ces deux cartes présentent un motif identique, à savoir que les aurores se répartissent en fréquence d'apparition dans une sorte d'anneau centré autour du pôle Nord magnétique et passant (sous nos longitudes) par la Laponie ; ainsi, Fritz compte plusieurs centaines d'aurores par an dans cette région du monde. Au fur et à mesure que l'on descend en latitude, la fréquence d'apparition des aurores diminue, pour ne plus être que d'environ deux par an en France.

De manière intéressante, on remarque aussi que la fréquence des aurores diminue lorsqu'on se rapproche du pôle Nord magnétique, pour être quasiment nulle au niveau de celui-ci. De part sa forme, la bande présentant le

maximum de fréquence des aurores (zone foncée sur la carte de Loomis) a reçu le nom d'ovale auroral.

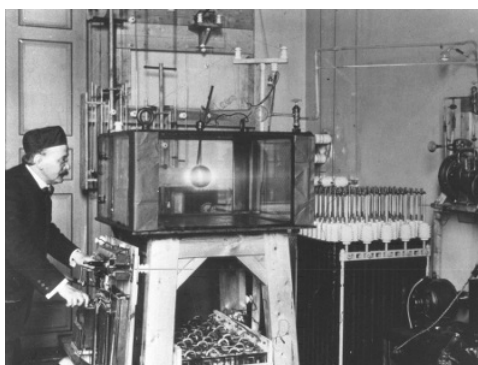
Si l'on dresse un bilan de l'état des connaissances sur les aurores boréales à la fin du XIX^e siècle, voilà ce que l'on sait :

- Les aurores ne se répartissent pas de manière aléatoire sur Terre, mais se concentrent dans un ovale centré sur le pôle Nord magnétique.
- Le phénomène n'est pas purement optique (réfraction, diffusion).
- Le phénomène semble indexé sur l'activité solaire. En effet, le Soleil présente un cycle d'activité de 11 ans, dont les évolutions sont suivies depuis le XVII^e siècle, par le comptage des tâches solaires (le Soleil présentant peu de tâches dans les périodes de faible activité, de plus nombreuses tâches dans les périodes de forte activité). Or, l'étude de la fréquence temporelle d'apparition des aurores (en un lieu donné) semble indiquer que celles-ci sont plus fréquentes en période de forte activité. On constate par ailleurs que plus l'activité du Soleil est importante, plus les aurores sont visibles bas en latitude (parfois jusqu'à l'équateur !).
- L'analyse du spectre lumineux des aurores par Angström montre la présence de raies d'émission, similaires à celles observées dans les tubes à décharges.

Les travaux de Kristian Birkeland

Il se trouve qu'en cette fin de XIX^e siècle, un physicien norvégien du nom de Kristian Birkeland travaille justement sur ces « *rayons de cathodes* »^[1].

Birkeland a l'idée de fabriquer un dispositif d'étude des rayons cathodiques présentant une géométrie particulière : une boule métallique au centre de laquelle est placée un aimant droit, placée dans une chambre à vide, contenant par ailleurs une cathode métallique, le tout étant relié à un générateur haute tension permettant d'établir une différence de potentiel de quelques kilovolts (kV) entre la cathode et la boule (figure 3). Il baptise son invention *Terrella* (signifiant « *petite Terre* » en latin), en l'honneur d'une expérience du même nom du physicien Gilbert servant à expliquer l'orientation de l'aiguille d'une boussole à la surface du globe terrestre.



Source - © 1913 Auteur inconnu / www.phy6.org ou mizar.blogalia.com/

Figure 3. Le physicien norvégien Kristian Birkeland devant l'une des ses nombreuses *Terrella*.

La figure 4a, ci-dessous, montre une des premières observations de Birkeland. L'image étant formée sur une plaque photographique, les contrastes sont inversés ; ainsi, l'anneau sombre correspond à un anneau brillant observé par Birkeland autour d'un pôle de la sphère magnétisée.

Connaissant la carte de Fritz, Birkeland tient là l'explication du phénomène des aurores boréales : ce sont des rayons de cathodes issus du Soleil qui provoquent des émissions lumineuses (spectre de raies) dans l'atmosphère terrestre ! Les aurores artificielles sont circulaires autour des pôles magnétiques de la *Terrella*, ce qui explique, pour la Terre, que les lignes d'isofréquence d'observation soient elles aussi circulaires et centrées sur le pôle Nord (pôles magnétiques et géographiques étant très proches). Il est remarquable de constater que l'ovale auroral déductible des cartes de Loomis et Fritz et reproduit par Birkeland à la fin du XIX^e siècle ne sera imagé que près d'un siècle plus tard, en 1981, par le satellite d'observation *Dynamic Explorer* (figure 4b).

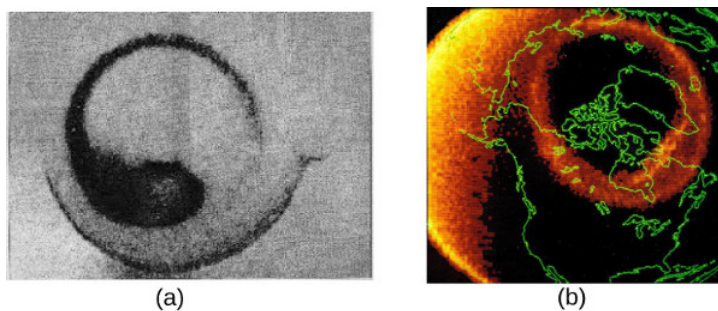


Figure 4. Similitudes entre (a) l'ovale observé dans la Terrella et (b) l'ovale auroral imagé, le 8 novembre 1981, près d'un siècle plus tard par le satellite Dynamic Explorer.

Depuis 1981, de nombreuses autres images ont été obtenues, par exemple une aurora australe terrestre (satellite IMAGE, 2005) ou une aurora jovienne (télescope spatial Hubble, 2000).

Les expériences de Birkeland permettront même d'envisager l'existence d'un second ovale autour du pôle Sud (figure 5), ce qui sera rapidement confirmé par l'observation. Grâce à son invention, Birkeland a réussi à expliquer en grande partie la nature des aurores polaires (boréales dans l'hémisphère Nord, australes dans l'hémisphère Sud).

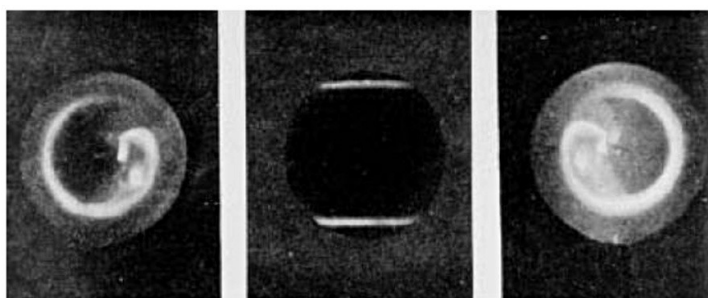


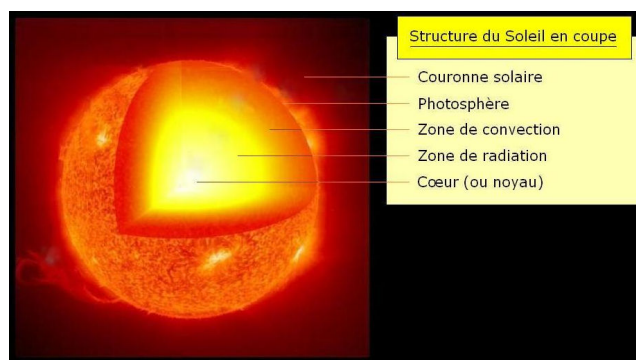
Figure 5. Observation simultanée des ovals Nord et Sud dans la Terrella de Birkeland.

La physique des aurores polaires

Comme l'avait compris Birkeland, les mécanismes à l'origine de la formation des aurores sont bien analogues à ceux conduisant aux décharges électriques dans les tubes à décharge. Pour comprendre la formation des aurores polaires, il faut remonter à l'origine des particules chargées arrivant dans l'atmosphère : le Soleil.

La structure du Soleil

La figure 6, ci-dessous, présente une structure en coupe sommaire du Soleil. Celui-ci est découpé en plusieurs couches concentriques différenciées par leurs propriétés physiques.



Source - © [wikimedia/org](https://commons.wikimedia.org/)

Figure 6. Observation simultanée des ovals Nord et Sud dans la Terrella de Birkeland.

On trouve ainsi successivement :

1. **Le noyau** : c'est le cœur du Soleil. Sa température est d'environ 15 millions de Kelvins. Il est le siège des réactions thermonucléaires (fusion de l'hydrogène) à l'origine de la luminosité du Soleil.
2. **La zone de radiation** : située entre 0,25 et 0,7 rayon solaire elle correspond à une zone très dense et très chaude, dans laquelle les mouvements d'ensemble (convection) sont impossibles. Les transferts de chaleur se font uniquement sous forme radiative, les photons émis dans le cœur par les réactions nucléaires étant absorbés et réémis un très grand nombre de fois avant de pouvoir atteindre la couche supérieure (on estime à plusieurs dizaines jusqu'à quelques centaines de milliers d'années le temps passé par un photon émis dans le cœur pour quitter la zone radiative).
3. **La zone convective** : elle s'étend de 0,7 rayon solaire à la surface du Soleil. Elle est séparée de la zone radiative par une couche de transition appelée tachocline, couche d'importance particulière dans la génération du champ magnétique solaire. La température suffisamment basse de la zone de convection permet des transferts de chaleurs principalement sous forme convective, la température passant de quelques millions de Kelvins à environ 5 800 Kelvins.
4. **La photosphère** : zone superficielle du Soleil, la photosphère correspond à la zone d'émission des photons visibles depuis la Terre. Sa température est d'environ 5 800 K et son spectre de rayonnement correspond globalement à celui d'un corps noir.
5. **La couronne solaire**. La zone située au-delà de la photosphère s'appelle l'atmosphère solaire. Elle se termine par l'héliosphère dont l'étendue permet de définir les limites du système solaire. Dans cette atmosphère solaire, la couche principale est la couronne solaire, zone de faible densité mais dans laquelle la température remonte à quelques millions de degrés, la rendant principalement visible dans le domaine UV.

Outre les photons balayant tout le spectre électromagnétique, le Soleil dissémine aussi en permanence dans l'espace des particules chargées, protons et électrons et particules α (noyaux d'hélium). L'astrophysicien Parker montra en 1955 que cette émission de particules a lieu selon un flux plus ou moins continu qu'il baptisa **vent solaire**.

On estime à environ 10^{14} kg la masse perdue par jour par le Soleil sous forme de vent solaire, ce qui correspond à environ 25% de la masse perdue par rayonnement (la puissance rayonnée par le Soleil étant d'environ 4.10^{26} W, cela correspond, pour une journée (86400 s), à une énergie totale équivalente à une masse de matière de l'ordre de 4.10^{14} kg, d'après la relation de correspondance énergie-matière $E=Mc^2$). La densité moyenne de particules à 1 UA^[2] est d'environ 5 ions et 5 électrons par cm^3 dans le plan de l'écliptique.

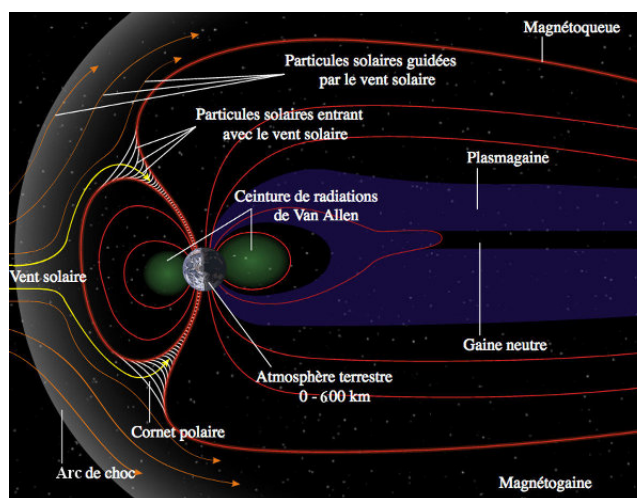
La vitesse moyenne du vent solaire électronique est d'environ 400 km/s, ce qui correspond à une énergie moyenne de 0,5 eV^[3]. Or, la tension appliquée par Birkeland dans son expérience pour observer des émissions lumineuses était de l'ordre du kV.

On comprend dès lors aisément que l'énergie des électrons solaires est très insuffisante pour conduire à la formation d'aurores. En fait, **un électron du vent solaire qui pénétrerait directement dans l'atmosphère terrestre serait arrêté dans les premiers kilomètres sans produire aucune émission lumineuse visible.**

Accélération des particules : le rôle de la magnétosphère terrestre

Pour pouvoir voir des aurores polaires, il faut donc qu'il y ait un (ou des) mécanisme(s) d'accélération qui permettent d'obtenir des énergies beaucoup plus élevées. Ces mécanismes trouvent leur origine dans la magnétosphère terrestre, dont la figure 7, ci-dessous, présente une coupe schématique simplifiée. Ce schéma reste cependant assez complexe, avec de nombreux éléments qu'il convient d'explicitier.

Le champ magnétique terrestre est en première approximation dipolaire. Sa représentation ressemble alors à celui d'un aimant droit (voir les expériences de visualisation des lignes de champ avec de la [limaille de fer](#)). Seulement, ce champ est perturbé par le vent solaire : il est comprimé du côté de celui-ci, et présente un allongement côté nuit, appelé « *magnétoqueue* ». La zone d'influence de la magnétosphère terrestre est limitée par la magnétopause, celle-ci constituant un « *arc de choc* » (*bow shock*) côté jour.



Source - © D'après NASA, modifié

Figure 7. **Représentation schématique simplifiée de la magnétosphère terrestre.**

Les particules chargées du vent solaire arrivant en direction de la Terre voient en première approximation un champ magnétique dipolaire qui va avoir pour effet de les dévier : vers l'Est pour les ions positifs, vers l'Ouest pour les électrons. La conséquence principale de cette séparation de charges est la création d'un **champ électrique** global traversant la magnétosphère.

Côté nuit, la magnétopause est une frontière assez poreuse, et les particules chargées vont pouvoir pénétrer dans la magnétosphère. Les mouvements des particules sont alors assez complexes, et des instabilités locales vont faire apparaître plusieurs zones de stockage des particules qui diffèrent par leur propriétés physiques : feuillets de plasma, plasmasphère, ceintures de radiation (ou de Van Allen), anneau de corotation, etc.

La zoologie de toutes ces zones n'a que peu d'intérêt ici. **Ce qu'il faut retenir, c'est que la magnétosphère contient plusieurs « zones de stockage »** dans lesquelles les particules issues du vent solaire vont résider un certain temps, en subissant un certain nombre de processus d'accélération, dus au gradient de champ magnétique existant, mais surtout aux différents et complexes champs électriques présents, dont le champ global cité précédemment (notons qu'un des ces courants magnétosphériques porte le nom de « *courant de Birkeland* »). Il en résulte un réservoir de particules chargées (principalement des électrons) énergétiques à proximité de la Terre.

Ces particules « *en attente* » dans la magnétosphère vont pouvoir précipiter dans l'atmosphère terrestre à l'occasion d'évènements perturbés : les sous-orages magnétiques. La forme de la magnétosphère terrestre présenté sur la figure 7, ci-dessus, correspond à un état moyen, lorsque le Soleil est calme.

Or, le Soleil présente une activité magnétique très variable, avec de très fortes variations temporelles et spatiales. Ces variations vont se propager dans le vent solaire, modifiant le champ magnétique interplanétaire et perturbant fortement le champ magnétique terrestre, notamment côté nuit. Apparaissent alors des zones de reconnexion magnétique (les lignes de champ, plutôt que de former une longue magnétoqueue stable, rebouclent à proximité de la Terre) permettant l'entrée massive de particules dans l'atmosphère. Celles-ci vont alors suivre en spiralant les lignes de champ magnétique, qui vont les guider vers un des deux pôles magnétiques.

Les particules (principalement des électrons) vont alors interagir avec les constituants de l'atmosphère vers une altitude située entre 80 et 200 km : elles se « *déposent* » alors dans une bande située autour du pôle magnétique : c'est l'ovale auroral.

Formes et couleurs des aurores

Les particules chargées interagissent avec les constituants de l'atmosphère, conduisant à création d'émissions lumineuses : c'est la naissance des aurores polaires.

Tout comme pour les nuages, il existe toute une « *zoologie* » des aurores polaires, décrivant leur forme et leur dynamique : en arc, en bande, en couronne ; diffuse, discrète ; calme, active, pulsante, etc.

Toutes ces variations dans la forme et la dynamique sont dues à la nature locale du champ magnétique, elle-même imputable aux caractéristiques du sous-orage magnétique. Ces structures sont donc difficilement prévisibles, et cette classification a surtout pour but de décrire les aurores.

La couleur des aurores est plus facilement compréhensible, et est directement reliée à la nature des espèces présentes dans l'atmosphère. La figure 8, ci-dessous, offre un panel des différentes couleurs visibles dans les aurores polaires.



Figure 8. Panel des différentes couleurs visibles dans les aurores polaires.

Pour d'autres images ou animations d'aurores polaires terrestres (et joviennes), (re)lisez [*De 2013 à 2015, profitez du maximum solaire pour aller à la chasse aux aurores polaires.*](#)

On trouve ainsi principalement :

- **du vert** : c'est la couleur prépondérante dans la majorité des aurores polaires, en partie parce que l'œil humain est plus sensible au vert. Elle est due à la raie d'émission à 557 nm de l'oxygène atomique. C'est pourquoi elle se produit principalement entre 100 et 200 km d'altitude (en dessous de 80 km, l'oxygène est présent sous forme d'oxygène moléculaire O_2).
- **du rouge** : c'est généralement la deuxième couleur la plus visible dans la plupart des aurores. Elle est due à la raie d'émission à 630 nm de l'oxygène atomique. On la trouve généralement à haute altitude (au-dessus de 200 km), car c'est une transition interdite (état métastable) dont la durée de vie est de l'ordre de la minute. Ainsi, si la densité moléculaire est trop importante, l'oxygène excité se désexcite par collision avant d'avoir pu émettre un photon lumineux. Lorsque du rouge est visible à basse altitude, il est dû à des bandes d'émission de l'azote moléculaire N_2 .
- **du pourpre** : cette couleur est due aux bandes d'émission situées dans le rouge et surtout le violet de l'azote moléculaire ionisé N_2^+ . Il s'agit généralement de la couleur prépondérante à très basse altitude (en-dessous de 80 km). Il faut une aurore relativement puissante pour que les électrons arrivent à descendre aussi bas en altitude.
- **du bleu** : plus rare, le bleu peut s'observer à basse altitude (en-dessous de 80 km) et est dû à des bandes d'émission (relativement faibles) de l'azote moléculaire N_2 .

À noter qu'en plus de ces émissions bien visibles, les aurores émettent dans l'ultra-violet et dans l'infrarouge. Moins joli pour l'œil humain et le photographe, mais tout aussi intéressant pour le scientifique pour pouvoir étudier les aurores (souvent, les images satellitales d'aurores sont la superposition d'une image UV - avec l'UV rendu par du vert, couleur dominante dans le visible - sur un fond d'image de la Terre ou de la planète prise dans le visible).

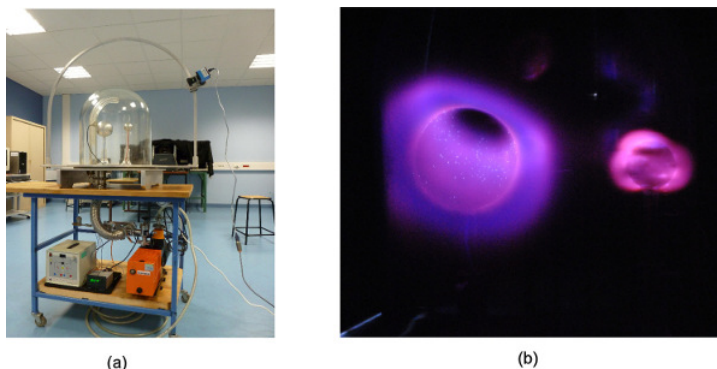
La Planeterrella : simulateur d'aurores boréales

Pour finir, nous présentons succinctement un démonstrateur d'aurores boréales : la Planeterrella.

Birkeland construisit en tout 14 *Terrella*, de tailles diverses, pour ses expériences. S'il avait réussi à expliquer la formation des aurores boréales, Birkeland mit un peu trop d'espoir dans sa machine, et il pensa pouvoir s'en servir pour expliquer de nombreux phénomènes, comme les anneaux de Saturne (dont la nature est pourtant bien différente d'un anneau de plasma).

À sa mort en 1917 à Tokyo (des suites d'un état de santé fragile en partie dû à une intoxication aux vapeurs du mercure utilisé dans les pompes à vide de ses *Terrella*, son expérience tomba peu à peu dans l'oubli et sa plus grosse *Terrella*, fut abandonnée dans l'université de Christiana (aujourd'hui Oslo). Elle fut déplacée à l'observatoire auroral de Tromsø, où l'ingénieur norvégien Terje Brundtland décida de la restaurer en 1995.

C'est lors d'un voyage scientifique à Tromsø que le chercheur grenoblois Jean Lilensten, voyant l'expérience de Birkeland à nouveau en fonction, décida d'améliorer le concept pour en faire un démonstrateur d'aurore boréale, principalement à destination des scolaires et du grand public : la Planeterrella (figure 9 (a), ci-dessous). Le principe de base est le même que dans l'expérience de Birkeland, à la différence près que deux sphères magnétisées ont été placées dans la cloche à vide sur des pieds mobiles, permettant d'envisager différentes configurations spatiales. La figure 9 (b), ci-dessous, montre un exemple de simulation réalisée avec une Planeterrella.



Source - © (a) Jean Lilensten, (b) David Bernard / planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/

Figure 9. Planeterrella réalisée au Laboratoire de Planétologie de Grenoble.

(a) Dispositif. (b) L'une des nombreuses configurations accessibles avec la Planeterrella.

Ici, la grosse sphère est reliée à la cathode, et la sphère de lumière violette simule la couronne solaire, avec les trous coronaux visibles aux pôles.

De nombreuses photographies ainsi que des explications détaillées des phénomènes et de l'expérience sont disponibles sur le site de la Planeterrella : planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/. On y trouve en particulier certains travaux scolaires basés sur l'expérience, ainsi qu'une liste des différentes Planeterrellas existant dans le monde, certaines étant accessibles au grand public.

^[1] L'électron est découvert en 1896 par Thomson, mais le nom et le concept mettront une quinzaine d'années à diffuser totalement. Les physiciens spécialistes des tubes à décharges continuent à utiliser le terme de « *rayons de cathodes* » au début du XX^e siècle.

^[2] L'Unité Astronomique (UA) est une unité de mesure de distance utilisée en astrophysique. Elle correspond à la distance moyenne Terre-Soleil, et vaut environ 149,6 millions de kilomètres.

^[3] 1 eV = 1,6 10⁻¹⁹ J, énergie cinétique d'un électron initialement au repos et accéléré par une différence de potentiel de 1 V.