

# Planeterrella

---

Mise en place de l'expérience permettant  
d'étudier des aurores polaires en laboratoire

**Gwenaëlle Monterde, Matthieu Péchon, Serguei Tytarenko**

**Promo 2011 Option TI**

Présentation et amélioration de l'expérience qui permet d'appréhender le fonctionnement des aurores boréales ainsi que de multiples phénomènes astrophysiques magnétiques : la Planeterrella

## Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier nos tuteurs de projets, Sandrine GRIMALD et Philippe GARNIER pour l'aide qu'ils nous ont apportés.

Nous souhaiterions aussi remercier Jean LILENSTEIN pour son soutien, ainsi que l'Observatoire de Midi-Pyrénées, plus particulièrement Patrick COUDERC pour nous avoir fourni une partie des devis.

Sans oublier Laurianne PALIN et Michel DUPIEUX pour leur aide précieuse, et pour nous avoir présenté leur Planeterrella à l'Observatoire et nous l'avoir prêtée lors de notre passage à l'oral, nous gratifiant par la même occasion de leur présence.

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I. Du phénomène naturel à l'observation en laboratoire</b> .....	<b>5</b>
<b>1) Les aurores polaires : résumé du phénomène</b> .....	<b>5</b>
<b>2) La Terrella de Birkeland</b> .....	<b>7</b>
<b>3) La Planeterrella</b> .....	<b>8</b>
a. Ovaux Auroraux .....	9
b. Anneaux de courants stellaires.....	10
c. Trous coronaux.....	11
d. Les ceintures de radiations de Van Allen.....	11
e. Autres configurations .....	12
<b>4) Notre contribution</b> .....	<b>13</b>
a. Avantages & inconvénients de la Planeterrella de base.....	13
b. Quelques améliorations.....	14
<b>II. Partie Technique</b> .....	<b>15</b>
<b>1) Généralités</b> .....	<b>15</b>
a. Schéma global.....	15
b. Détail des appareillages nécessaires .....	16
c. Schéma électrique détaillé .....	17
<b>2) Sécurité HT</b> .....	<b>18</b>
<b>3) Solutions techniques</b> .....	<b>19</b>
a. Rotation .....	20
b. Changement de gaz sous la cloche .....	24
c. Translation verticale des sphères .....	24
d. Translation de la buse / non solutionné.....	25
<b>4) Utilisation des arcs électriques</b> .....	<b>26</b>
a. Quel intérêt ?.....	27
b. Solutions techniques : enlever les boules / canon .....	27
<b>5) Listes du matériel nécessaire</b> .....	<b>28</b>
a. Matériel disponible à l'IUT.....	28
b. Matériel à acquérir .....	29
<b>III. Utilisation concrète en Travaux Pratiques</b> .....	<b>31</b>
<b>1) Magnétisme (1<sup>ère</sup> année)</b> .....	<b>31</b>
<b>2) Electricité : arcs électriques (2<sup>ème</sup> année)</b> .....	<b>32</b>
<b>3) Physique / Optique / Techniques spectroscopiques (2<sup>ème</sup> année)</b> .....	<b>35</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>37</b>

## Introduction

La Planeterrella est une expérience, dont plusieurs exemplaires sont disponibles à travers le monde, qui permet d'étudier en laboratoire des phénomènes astrophysiques magnétiques tels que les aurores polaires. Elle est la petite sœur de la Terrella de Birkeland, inventée fin XIXème.

Si elle semble cerner des domaines assez restreints (astrophysique, magnétique), elle permet d'étudier des branches diverses de la physique, comme le magnétisme, l'étude du vide, des arcs électriques, la spectrométrie, l'atomistique...

C'est pourquoi nous avons pour projet de créer une Planeterrella à l'IUT, qui sera utilisée dans de nombreux travaux pratiques, touchant à tous ces domaines. Il s'agit certes d'un investissement, mais il sera rentabilisé par la diversité de ses utilisations. Il ne s'agit pas simplement d'une manipulation qui sert dans une seule série de TP, elle pourra être utilisée en travaux pratiques de magnétisme et en optique en première année, ainsi qu'en techniques du vide (étude de la loi de Paschen et arcs électriques) et techniques spectroscopiques en seconde année.

La Planeterrella, dans sa version de base, existe aux quatre coins du monde. Notre projet, outre rendre possible la création de la manipulation à l'IUT, consiste à apporter des améliorations à cette version de base. Ce faisant, nous pourrions visualiser bien plus de phénomènes, et ce à un moindre coût.

Dans un premier temps, nous allons vous expliquer le phénomène naturel des aurores polaires afin de mieux comprendre le principe de la manipulation. Ensuite nous ferons un peu d'histoire, avec la création de la Terrella de Birkeland, et l'invention de la Planeterrella. Nous vous montrerons dans cette partie quelques exemples de ce que l'on peut visualiser avec la Planeterrella. Puis, nous vous exposerons les améliorations que nous avons prévu d'apporter à la version de base. Ensuite, nous développerons la partie technique, avec les plans et les schémas de montage de notre expérience. Ainsi nous ferons un bilan du matériel déjà disponible à l'IUT et de celui à acquérir. Enfin, nous justifierons sa création en vous exposant en détail son utilisation en travaux pratiques à l'IUT Mesures Physiques.

# I. Du phénomène naturel à l'observation en laboratoire

## 1) Les aurores polaires : résumé du phénomène

Les aurores polaires sont présentes sur les deux pôles magnétiques terrestres : au Nord, aurores boréales, au Sud, aurores australes. Elles ne dépendent aucunement de l'activité humaine, mais uniquement de celle du Soleil et du champ magnétique terrestre.

Pendant longtemps (et ce jusqu'à Birkeland), nous avons cru à tort que les aurores étaient dues à la réflexion de la lumière solaire sur les glaces arctiques.



Figure 1 : Une aurore boréale (pôle Nord)

C'est effectivement le soleil qui est responsable des aurores polaires. La surface turbulente du soleil rejette dans l'espace des atomes et des particules subatomiques (protons, électrons), c'est ce que l'on appelle le vent solaire. Lors de violentes tempêtes solaires, une grande quantité d'électrons et de protons venant du soleil arrivent dans l'atmosphère terrestre et excitent les atomes d'oxygène et d'azote, lesquels se désolvent en émettant des photons qui produisent les magnifiques voiles (rubans ou rideaux) de lumière colorée que sont les aurores polaires.

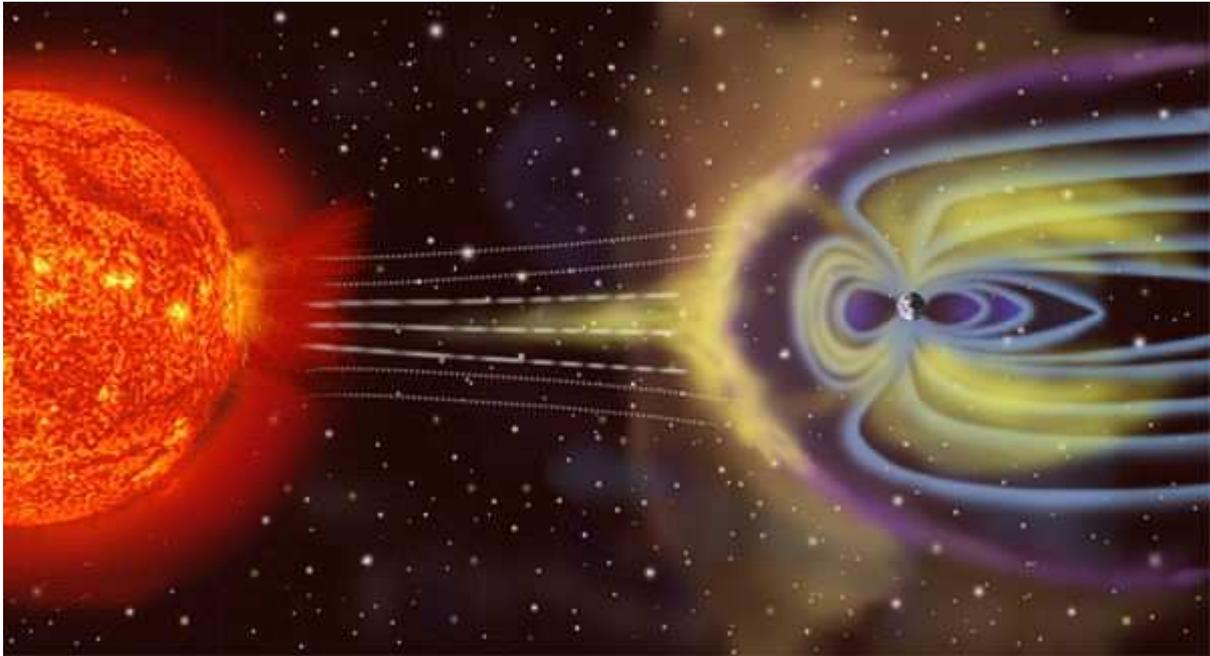
L'aurore a la forme d'une mince bande elliptique - l'ovale auroral - centrée sur les pôles nord et sud magnétiques, soit environ à 700 mètres des pôles géographiques. La grandeur de cette forme dépend de l'activité solaire : plus le Soleil est "silencieux" et le vent solaire calme, moins l'ovale est grand. Inversement : plus le vent solaire frappe le champ magnétique terrestre avec force et rafale, plus l'aurore devient large et s'étend. Des cas de fortes perturbations solaires, associées à des conditions météorologiques clémentes, ont permis de voir des aurores polaires jusqu'en France !

### *Zoom sur le vent solaire et la magnétosphère:*

La température de l'atmosphère solaire est de plusieurs millions de Kelvin. À ces températures, les collisions entre les particules sont si violentes que les atomes d'hydrogène se décomposent en électrons et en protons. Ce "matériel" ionisé est appelé plasma. Le vent solaire, c'est le flux de ce plasma qui s'éloigne du soleil dans toutes les directions. Il transporte le champ magnétique solaire dans l'espace interplanétaire. La vitesse et la densité de ce vent solaire varient beaucoup. Celles-ci sont plus grandes quand le vent provient des régions actives du soleil, comme les taches ou les protubérances solaires.

Des chiffres... La densité moyenne du vent solaire, lors de son voyage du Soleil à la Terre, est de 8 particules par cm cube et sa vitesse moyenne, de 400 km/s; il prend un peu plus de 4 jours pour atteindre la Terre.

La Terre, elle, se protège de toutes les particules qui lui arrivent dessus grâce à sa magnétosphère (c'est à dire une immense bulle de champ magnétique qui dévie le vent solaire).



*Figure 2 : Schéma du vent solaire attaquant la magnétosphère*

Quelques-unes des particules du vent solaire sont capturées par le champ magnétique terrestre et accélèrent pendant leur trajet vers le bas, le long des lignes de champ magnétique jusque vers l'ovale auroral.

En route, elles accumulent de l'énergie, et, lorsqu'elles entrent dans l'atmosphère, font collision avec l'oxygène et l'azote. Ainsi, les atomes d'oxygène et d'azote sont excités. C'est la désexcitation de ces atomes qui permet l'émission de photons, créant ainsi de la lumière. C'est l'aurore!

### *La couleur des aurores boréales :*

La lumière solaire (les électrons) qui arrive dans l'atmosphère terrestre entre en collision avec différentes molécules. Chaque gaz atmosphérique va briller différemment selon son état, neutre ou chargé, et aussi selon l'énergie de la particule qui le frappe.

La couleur jaune-verte, la plus éclatante et la plus fréquente, est émise par les atomes d'oxygène qui sont à environ 100 km d'altitude. Ceux qui sont plus haut, au-delà de 300 km, émettent une lumière rouge foncé.

Les aurores toutes rouges sont rares. C'est d'ailleurs ce genre d'aurores qui a quelquefois causé la confusion : certains avaient pris une aurore polaire rouge pour la lueur d'un feu de grande envergure; plus d'une fois on a fait appel aux pompiers pour éteindre... une aurore polaire!

Finalement, les molécules d'azote, qui sont neutres, à un bas niveau, produisent une lumière rouge pâle quand elles sont frappées par les électrons. L'azote de la haute atmosphère devient ionisé et émet du bleu et du violet.

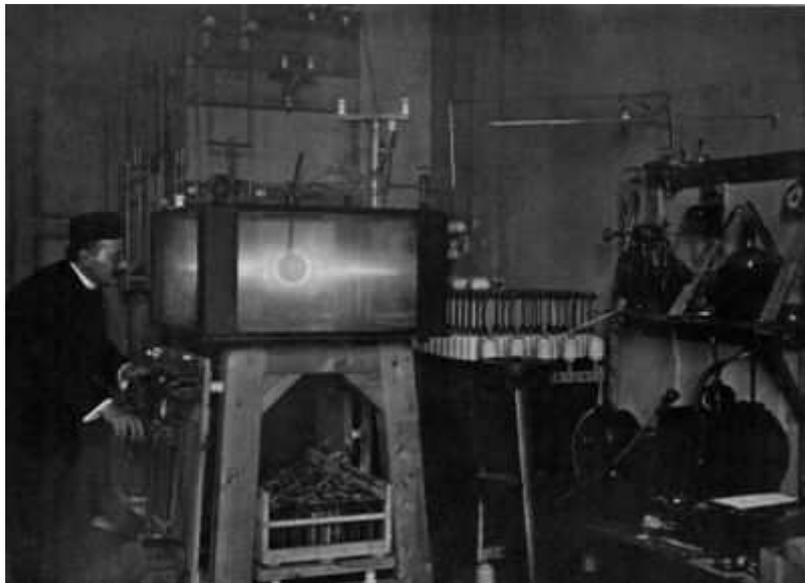
Certaines aurores sont rouges avec un soupçon de vert, de bleu, de jaune et de blanc. Mais de façon plus générale, les aurores apparaissent blanchâtres avec quelques reflets verts et rarement des reflets rougeâtres. Mais à cause de la faible luminosité des aurores et de la noirceur de la nuit, notre œil perçoit mal les couleurs. Dans le sud du Canada et dans le nord des Etats-Unis, on observe surtout des aurores boréales de couleur verte.

## 2) La Terrella de Birkeland

"Terrella" désigne en latin une "petite terre", c'est le nom donné par Sir William Gilbert (1600) à la sphère magnétisée avec laquelle il montra à la Reine Elizabeth I sa théorie du magnétisme terrestre. En déplaçant une petite boussole autour de la « terrella » et en montrant qu'elle pointait toujours dans la direction Nord Sud, Gilbert déduisit que la même chose se produisait sur terre mais à une plus grande échelle. Le magnétisme terrestre expliquait pourquoi la boussole se plaçait dans la direction Nord Sud.

En 1839, Gauss démontra que le champ magnétique terrestre était celui d'un dipôle incliné d'une dizaine de degrés par rapport à l'axe de rotation. D'autres phénomènes ont depuis lors été observés : dans un premier temps, des physiciens ont remarqué que les boussoles perdent les pédales en présence d'une aurore polaire, et d'autre part des astrologues ont montré qu'il y avait un lien entre l'activité solaire et l'intensité des aurores. À partir de là, les scientifiques ont déduit que les aurores polaires étaient dues d'une part à l'activité solaire, et d'autre part au champ magnétique terrestre. En 1879, Becquerel postule que les aurores sont dues à des particules provenant du soleil.

Partant de toutes ces hypothèses, Kristian Olaf Bernhard Birkeland (fin XIXème) a eu l'idée d'envoyer des particules sur une sphère aimantée représentant la Terre. Il utilisa la Terrella : il la plaça dans une chambre à vide faite en verre. Il bombarda cette terrella par un faisceau d'électrons et observa leur passage par la décharge que ces électrons produisaient dans l'air résiduel resté dans la chambre à vide. La décharge suivait les lignes du champ magnétique (lignes de force) et convergeait près des pôles magnétiques de la terrella.



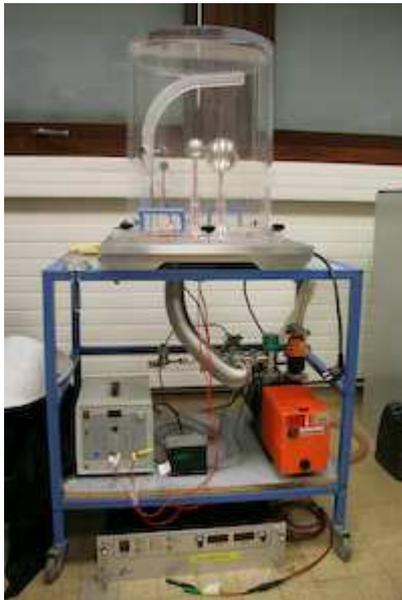
*Figure 3 : Birkeland et sa Terrella*

Dans sa conception, le canon à électrons figurait le soleil, et la sphère magnétisée figurait naturellement la Terre. La configuration de son expérience lui a permis de voir également, sans les identifier, les anneaux de courant découverts ensuite par James van Allen. Malheureusement, Birkeland n'a pas donné la bonne interprétation de ses observations : il pensait voir l'origine des

anneaux de Saturne. Les astronomes s'opposaient à cette interprétation, arguant que Saturne n'émet pas d'électricité, et que les anneaux avaient clairement été identifiés comme des roches et glaces. Mais K. Birkeland refusait cette vision des choses. Il déduisit que la majeure partie des mécanismes cosmiques était faite d'interactions électriques et magnétiques dans des gaz ionisés, qu'on appelle des « plasmas ». En cela, il ne se trompait guère, mais nous ne l'avons réalisé qu'à la fin du vingtième siècle. Il était tellement sûr de son interprétation qu'il baptisa sa dernière Terrella, la plus grande, « L'Univers ».

### 3) La Planeterrella

L'unique sphère magnétique de la Terrella de Birkeland s'est transformée en deux sphères creuses aimantées : c'est la Planeterrella. La facilité des équipements modernes rend son utilisation beaucoup plus aisée que ne l'était celle de la Terrella.



Différents éléments du dispositif :

- Une cloche à vide et une pompe permettent de reproduire les conditions de pression nécessaire à l'apparition des aurores polaires (pression au sein de la cloche de l'ordre du Pascal).
- Un générateur de haute tension permet d'alimenter la cathode (buse), qui envoie des électrons, synthétisant le vent stellaire.
- Deux sphères creuses, à l'intérieur desquelles on place des aimants permanents afin de représenter des planètes et leur champ magnétique.
- Un boîtier de commande sert à inverser la polarité : parfois c'est la buse qui envoie les électrons, d'autres fois les échanges se font entre les sphères.

*Figure 4 : Une Planeterrella*

Une étoile est un astre qui émet de l'énergie, sous forme de rayonnement et de particules électriques (électrons et ions). Le vent de ces particules s'appelle le « vent stellaire » et, dans le cas du soleil, le « vent solaire ».

Dans cette expérience, nous pouvons connecter indifféremment une buse électrique (c'est-à-dire un simple tube métallique), et / ou une ou deux sphères au pôle NEGATIF de notre générateur (qui n'est rien de plus qu'une grosse pile électrique, produisant du courant continu). Dans la description de la manip, ce qui est connecté ainsi EMET de l'électricité : nous l'appelons « une étoile ».

Une planète reçoit l'énergie de son étoile, c'est-à-dire le rayonnement et le vent stellaire. Dans notre expérience, nous pouvons connecter indifféremment une buse électrique et/ou une ou deux sphères au pôle POSITIF de notre générateur. Dans la description de la manip, ce qui est connecté ainsi RECOIT de l'électricité : nous l'appelons « une planète ».

Il existe plusieurs configurations pour la Planeterrella. Nous en montrons quelques unes dans les exemples qui suivent. *N'ayant pas pu faire nous-mêmes les expériences suivantes, ces extraits sont tirés du site très complet sur la Planeterrella. (cf. Biblio) © Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS/ESAV*

### a. Ovaux Auroraux

La buse électrique est une étoile, la petite sphère est une planète. Nous voici dans le monde de Birkeland : il a, lui aussi, amplement observé cette configuration, et en a tiré de très nombreux articles scientifiques. C'est par ces observations qu'il a démontré le mécanisme des aurores polaires.



*Figure 5 : à gauche les ovaux auroraux de la Terre  
à droite les ovaux auroraux observés sur Planeterrella*

Les électrons sont tirés par la buse – étoile. Ils sont attirés vers la sphère par le champ électrique qui règne entre eux. Ce champ existe uniquement parce que la buse est reliée au pôle moins du générateur et la sphère au pôle plus. En arrivant à proximité de la sphère, les électrons commencent à subir l'influence du champ magnétique. Plus ils s'approchent des aimants, plus le champ croît.

L'effet de cette croissance de champ est de forcer les électrons à tourner autour de la sphère. Là, ils cognent dans le gaz encore présent, de l'air très raréfié. Ces collisions excitent et ionisent le gaz, mélange d'azote et d'oxygène. En revenant à l'équilibre, l'air rend son énergie sous forme de lumière : c'est la création des aurores polaires, et du rayonnement visible avec la Planeterrella. Mais dans cette configuration, tôt ou tard, les électrons subissent une collision qui va les dévier vers les pôles. Ils s'y dirigent, s'y concentrent, heurtent l'atmosphère. La lumière est plus intense sur les ovaux auroraux parce que la concentration des électrons y est plus élevée.

## b. Anneaux de courants stellaires

Une des 2 sphères est une étoile, la buse électrique est une planète. Nous nous plaçons ici dans la configuration dans laquelle Birkeland a observé les anneaux qu'il a assimilés, à tort, aux anneaux de Saturne.

Les électrons sont tirés par la sphère, sur toute sa surface. Ils sont rabattus le long de l'équateur magnétique où ils sont contraints de tourner : le champ magnétique les attire. Mais il existe également un champ électrique entre la sphère et la buse. Ce champ existe uniquement parce que la sphère est reliée au pôle moins du générateur et la buse au pôle plus. En tournant dans l'anneau de courant stellaire, les électrons cognent le gaz encore présent, de l'air très raréfié. Ces collisions excitent et ionisent le gaz, mélange d'azote et d'oxygène. En revenant à l'équilibre, l'air rend son énergie sous forme de lumière : c'est la création du rayonnement visible avec la Planeterrella. Mais tôt ou tard, les électrons subissent une collision qui va les dévier vers la buse, attirés par le champ électrique. Ils bouclent ainsi le circuit.



*Figure 6 : à gauche des anneaux de courants stellaire observés sur Planeterrella, à ne pas confondre avec les anneaux de Saturne (à droite)*

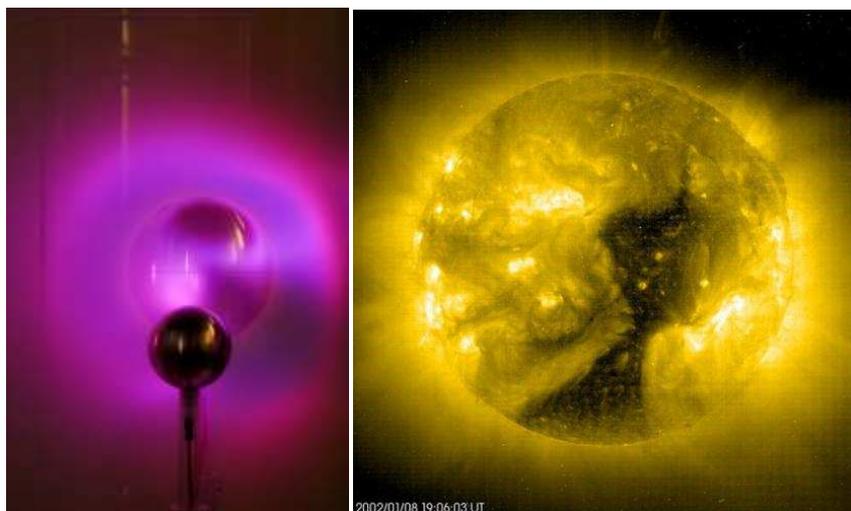
Un phénomène intéressant mérite d'être remarqué : le bord interne de l'anneau de courant ne se trouve pas tout contre la sphère, mais à un ou deux millimètres de la sphère. Entre la sphère et l'anneau, il existe une zone étroite sans émission lumineuse. Que se passe-t-il ?

L'air à l'intérieur de l'enceinte est un plasma : il est majoritairement composé de gaz neutre, celui que nous respirons, bien que très raréfié. Mais les électrons ionisent une partie de ce gaz au gré des collisions. Ainsi, le gaz contient également des ions et des électrons libres. Les ions sont attirés par la sphère, car la sphère est chargée négativement : comme dans un aimant, le plus et le moins s'attirent en électricité. Les ions créent une enveloppe autour de la sphère. Cette enveloppe s'appelle la « sphère de Debye » du nom Peter Joseph William Debye (1884 – 1966), un physicien et chimiste néerlandais qui découvrit ce phénomène. Debye obtint le prix Nobel en 1936. Le calcul de l'épaisseur de la sphère (la « longueur de Debye ») donne 1,8 mm, conforme à l'observation.

### c. Trous coronaux

Nous quittons désormais le monde de Birkeland. La grosse sphère est connectée au pôle moins du générateur : elle émet de l'électricité, et devient donc une étoile. La petite sphère, ou éventuellement la buse électrique est connectée au pôle plus du générateur : c'est une planète.

Lorsque la petite sphère est une planète, les ovales auroraux sont très bien visibles.



*Figure 7 : à gauche des trous coronaux observés sur Planeterrella, à droite ceux du soleil*

Concentrons-nous sur notre étoile. Les électrons sont émis sur toute la surface, mais sont écartés des pôles eux-mêmes, repoussés par le champ le plus intense. En s'éloignant de la sphère, ils excitent et ionisent le gaz ambiant, qui émet de la lumière en revenant à l'état fondamental : la lumière de la Planeterrella permet de tracer le parcours des électrons. Ceux-ci s'épandent dans l'enceinte, et dessinent ce qu'on appelle, pour le soleil ou les étoiles, une couronne en expansion.

Au-dessus des pôles magnétiques, l'absence de lumière constitue un « trou coronal », abondamment observé par divers satellites dans le cas du Soleil.

### d. Les ceintures de radiations de Van Allen

Dans cette configuration, la grosse sphère est une planète, qui reçoit son vent stellaire soit de la buse électrique, soit de la petite sphère (qui, dans ce cas, s'entoure d'un anneau fin de courant, cf. b.)

Ce qui est observé ici a peu ou pas été observé par K. Birkeland. La modularité des équipements modernes permettant de changer les configurations en est une des raisons : il fallait trois semaines au moins à Birkeland pour changer ce qui nous prend moins d'une demi-heure ! Mais la flexibilité du montage Planeterrella est la raison majeure.

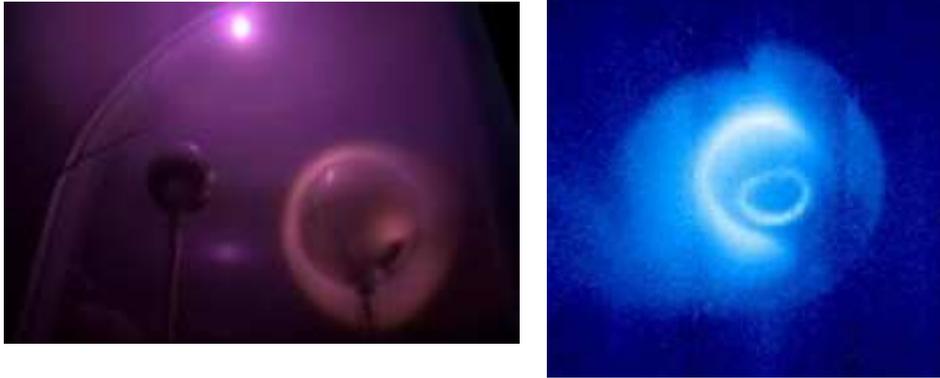


Figure 8 : à gauche une ceinture de Van Allen sur Planetterrella, à droite l'environnement spatial de la Terre vu de l'espace (Crédits NASA)

On distingue très bien l'enveloppe de plasma entourant la planète, et se finissant dans l'atmosphère sur les ovales auroraux. Il s'agit de la création des ceintures de radiation de Van Allen. Les électrons sont attirés vers la grosse sphère par le champ électrique. Ce champ existe simplement parce que la sphère est reliée au pôle plus du générateur. En arrivant à proximité de la sphère, les électrons commencent à subir l'influence du champ magnétique. Plus ils s'approchent des aimants, plus le champ croît. L'effet de cette croissance de champ est de forcer les électrons à tourner autour de la sphère (pour les physiciens : c'est une dérive de gradient). Là, ils cognent dans le gaz encore présent, de l'air très raréfié. Ces collisions excitent et ionisent le gaz, mélange d'azote et d'oxygène. En revenant à l'équilibre, l'air rend son énergie sous forme de lumière : c'est la création des aurores polaires, et du rayonnement visible avec la Planetterrella.

Mais tôt ou tard, les électrons subissent une collision qui va les dévier vers les pôles. Ils s'y dirigent, s'y concentrent, heurtent l'atmosphère. La lumière est plus intense sur les ovales auroraux parce que la concentration des électrons y est plus élevée.

### e. Autres configurations

Beaucoup d'autres configurations peuvent être observées, ce qui rend les utilisations de la Planetterrella d'autant plus intéressantes et multiples.

Si l'on se met dans le cas où la grosse sphère est une étoile et que l'on augmente la pression (plus de 100 Pa), on est en présence d'un astre fortement magnétisé avec une atmosphère dense (pour une couronne stellaire). En dessous de cette pression, nous avons un vent solaire en expansion. Mais voici que cette couronne se rétrécit pour se concentrer autour du pôle magnétique en un jet stellaire. La zone de Debye est parfaitement visible tout près de l'étoile ; mais plus spectaculaire encore, un cône de lumière trace le parcours des à la manière d'un jet stellaire.

On peut aussi étudier le cas étonnant d'Uranus. En effet, si la majorité des planètes ont leur axe magnétique très proche de leur axe de rotation (10° d'écart pour la Terre), c'est tout le contraire pour Uranus, qui affiche un écart de 97°, c'est-à-dire que ses deux axes sont quasiment perpendiculaires. Sur Uranus, le télescope spatial Hubble a clairement identifié, côté jour, la présence non d'un ovale auroral, mais d'une tache aurorale : les électrons du vent solaire

s'engouffrent directement dans le cornet polaire au dessus du pôle magnétique. Le télescope Keck a pourtant photographié un ovale auroral côté jour.

Et côté nuit ? La Terre se trouvant entre le Soleil et Uranus, il n'est pas possible de voir la face nocturne d'Uranus. Nous ne savons donc pas à quoi ressemblent les aurores nocturnes de cette planète.

Avec la Planeterrella, il est facile de s'amuser à simuler cette configuration. Il ne s'agit pas encore de science, car il faudrait modéliser numériquement l'ensemble et prouver qu'en dépit des différences d'échelles, la Planeterrella reproduit le système Soleil – Uranus.

Pour ce faire, nous déplaçons la buse électrique le long de sa potence pour la mettre au dessus de la petite sphère. Elle tire les électrons directement sur le pôle nord. Côté « jour », nous observons deux choses : la formation d'une tache aurorale sur le pôle magnétique, et celle d'un ovale auroral autour. Les observations spatiales sont bien reproduites.

Et côté nuit ? Nous voyons un ovale auroral brillant connecté à l'ovale diurne. Ainsi, si cette petite simulation peut avoir une qualité prédictive, nous pensons qu'une mission spatiale dévolue aux aurores d'Uranus et de Neptune devrait observer des ovales auroraux nocturnes !

#### 4) Notre contribution

Les versions existantes de la Planeterrella possèdent des utilisations multiples (différentes configurations, permettant de visualiser beaucoup de phénomènes), mais il y a des phénomènes qu'elles ne représentent pas. C'est pourquoi nous allons reproduire la Planeterrella, en lui ajoutant des modifications.

##### a. Avantages & inconvénients de la Planeterrella de base

La Planeterrella dans sa version de base est très complète : elle permet de visualiser entre autres des ovales auroraux, des anneaux de courants stellaires ainsi que les anneaux de Van Allen. Le nombre de ses configurations est quasiment infini, puisque nous pouvons non seulement déplacer les éléments, mais aussi faire varier la Pression ainsi que la tension déversée entre l'étoile et la planète. Cela permet de représenter différents paramètres présents, dans la nature, qui influent sur les aurores :

- Le champ magnétique est plus ou moins fort, selon les planètes. Les sphères étant dévissables, on peut aisément remplacer l'aimant à l'intérieur, et créer ainsi un champ magnétique d'amplitude choisie.

- L'axe de rotation de la planète et l'axe du dipôle ne sont pas alignés et cet angle varie d'une planète à l'autre. De la même manière, il suffit d'ouvrir les sphères pour modifier l'angle d'inclinaison, les aimants étant fixés de manière empirique (bien souvent à l'aide de papier et de Patafix®).

- Les planètes ne sont pas toutes à la même distance de l'étoile, donc de la buse à électron. Ceci est facilement modifiable étant donné que tout y est mobile : la buse électrique peut se déplacer sur son axe et sur sa potence, les potences des sphères peuvent monter et descendre à l'image du pied d'un parasol, on peut naturellement changer les sphères de place.

- L'inclinaison entre le vent stellaire et les planètes est variable. De la même manière, la buse électrique peut pivoter sur son axe, ce qui modifie l'inclinaison du vent stellaire.

Pour le moment, il faut ouvrir la sphère pour changer ces paramètres. Cela signifie que l'on doit casser le vide. C'est très contraignant et cela empêche son utilisation aisée et rapide en salles de Travaux Pratiques. Nous nous demanderons par la suite s'il est possible de modifier ces paramètres sans casser le vide.

## b. Quelques améliorations

Afin de visualiser encore plus de phénomènes, nous allons apporter quelques améliorations à la version de base. En effet, certains paramètres présents dans la nature ne sont pas représentés dans la manipulation, notamment :

-La rotation des planètes sur elles-mêmes. Ceci s'inclut facilement dans le dispositif, puisqu'il suffit d'ajouter un moteur au pied d'une des sphères pour la faire tourner.

-La rotation des planètes autour des étoiles. Cela peut se réaliser de deux manières. On peut tout simplement rajouter un dispositif qui permettrait de faire tourner la petite sphère autour de la grande, ce qui modéliserait ce phénomène. On pourrait trouver une solution toute autre : en effet, du point de vue de la planète, qui tourne autour de l'étoile, c'est bien l'étoile qui tourne sur elle-même ! Il suffirait alors de brancher le système en configuration : petite sphère / planète – grande sphère / étoile, puis de faire tourner la grande sphère sur elle-même. On visualiserait alors le phénomène de révolution.

La liste de ces améliorations possibles n'est bien sûr pas exhaustive, d'autres idées pourront survenir pour représenter de nouveaux phénomènes, présents à l'état naturel. Les solutions techniques que nous proposons sont consultables à partir de la page 19.

## II. Partie Technique

L'expérience existant déjà toute faite en plusieurs exemplaires à travers le monde, nous nous basons en grande partie sur les Planeterellas existantes pour effectuer nos plans. Nous donnons donc dans cette partie non seulement les plans pour la version de base, mais aussi les solutions techniques de nos améliorations, ainsi qu'une liste du matériel disponible à l'IUT et une autre du matériel à acquérir pour monter l'expérience. Nous aborderons aussi l'aspect sécurité, puisque, travaillant sous haute tension, il faut bien évidemment prévenir l'utilisateur d'éventuels dangers. Pour finir, nous évoquerons une utilisation parallèle de l'expérience, à savoir la visualisation d'arcs électriques.

### 1) Généralités

#### a. Schéma global

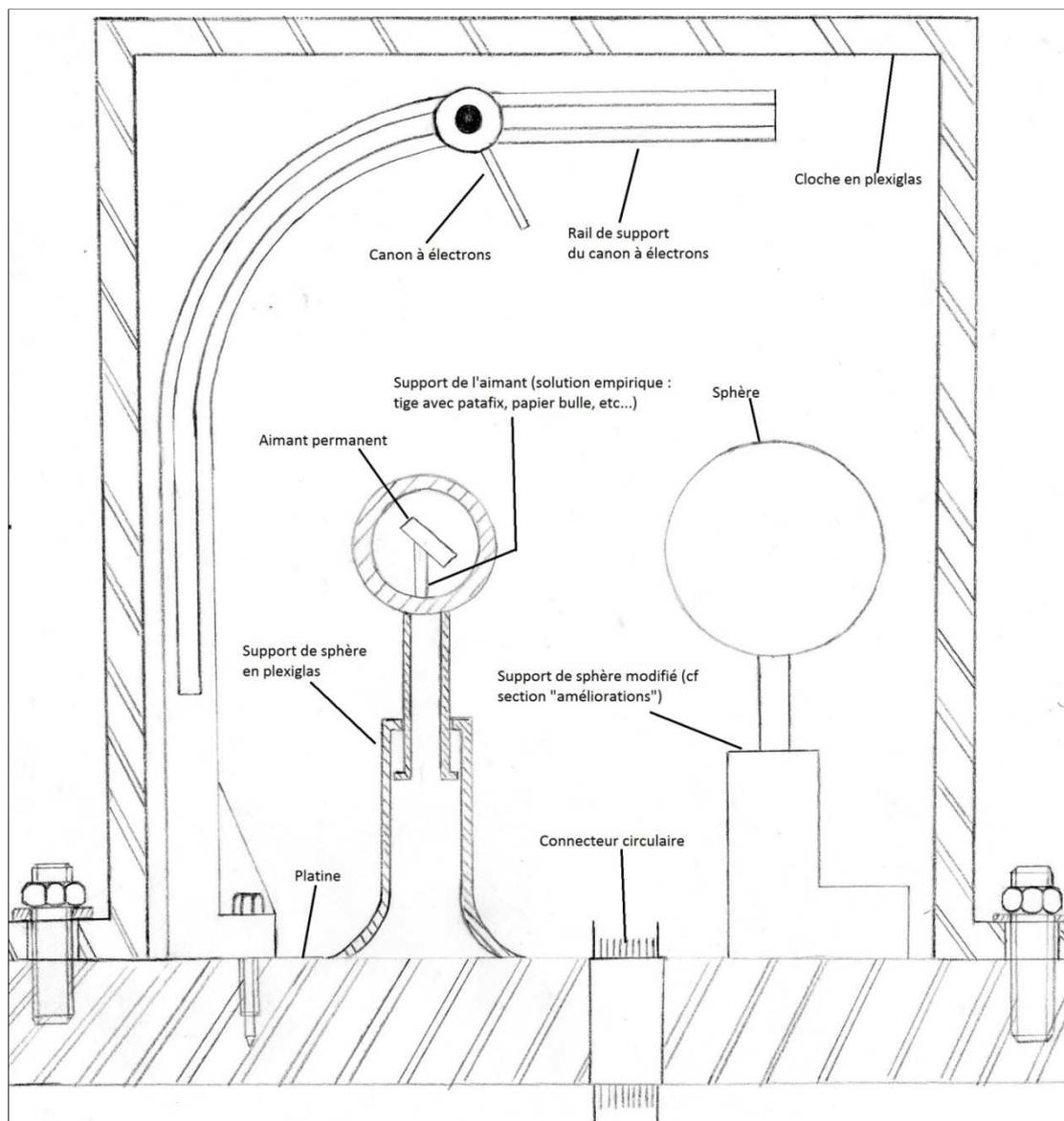


Figure 9 : Schéma global de l'installation dans la cloche à vide

En figure 9, une vue en coupe du montage. À la partie inférieure du connecteur circulaire viennent se brancher les câbles d'alimentation HT. On récupère cette tension dans la partie supérieure et on la renvoie vers les sphères et le canon à électrons. Ce même connecteur peut aussi être utilisé pour récupérer les signaux des différents capteurs (pression, ...) présents sous la cloche.

## b. Détail des appareillages nécessaires

- Une cloche à vide en Plexiglas : Elle doit être suffisamment grande pour contenir tous les éléments de l'expérience. On préférera le plexiglas au pyrex pour 2 principales raisons : la solidité et le fait que le plexiglas bloque les rayons U.V. qui sont nocifs pour les utilisateurs.

- Une platine en aluminium : Servira de support à l'expérience. Sa taille sera en fonction de celle de la cloche. Elle n'aura que 2 trous : le premier sera pour le raccord de la pompe à vide et le second pour le connecteur électrique. Il y aura aussi une rainure sur le pourtour, destinée à accueillir un joint d'étanchéité, afin d'assurer le vide sous la cloche.

- Une pompe à vide : Comme son nom l'indique, servira à faire le vide sous la cloche. On n'aura besoin que d'un vide primaire (de l'ordre du Pascal au cours de l'expérience).

- Un générateur de Haute Tension : Servira à alimenter en Haute Tension les sphères et le canon à électrons.

- 2 Sphères creuses en aluminium : Serviront à représenter les planètes. Elles contiendront des aimants qui représenteront le champ magnétique et seront alimentées en Haute Tension.

- Un canon à électrons fixé sur un rail : représentera le soleil et simulera le vent solaire. Il est connecté au générateur à Haute Tension et est connecté en tant que cathode par défaut.

- Des aimants permanents (terres rares) : ils seront placés à l'intérieur des sphères afin de simuler le champ magnétique des planètes. Le maintien dans les sphères se fera empiriquement (Patafix®, papier bulle, etc...), faute de solution viable pour le moment. Les aimants ne doivent pas être en contact avec les sphères, étant parcourues par une forte tension.

- 2 Supports en plexiglas : destinés à accueillir les sphères, ils seront réglables en hauteur et non fixés à la platine afin de pouvoir les déplacer aisément. L'un des deux supports pourra être d'une forme étudiée pour accueillir un boîtier moteur, dont nous parlerons dans la partie Solutions techniques.

- Un connecteur circulaire : fixé à la platine, il servira d'intermédiaire entre les alimentations électriques et les sphères et le canon à électrons. Il pourra aussi servir d'intermédiaire pour les capteurs qui seront disposés sous la cloche.

- Un appareil de régulation et de contrôle de pression : il permettra, à l'aide de capteurs, de mesurer en temps réel la pression sous la cloche à vide, et ainsi de la réguler (grâce à la pompe).

- Un boîtier de commande à Haute Tension : Il permettra de « switcher » entre différentes configurations sans avoir à refaire le câblage sur les sphères et le canon à électrons.

- Un chariot à roulettes : il permettra de déplacer facilement la manipulation en cas de besoin. Il devra être assez grand et comporter suffisamment de plateaux pour pouvoir y disposer tous les éléments nécessaires.
- Divers câbles/tuyaux d'air/raccords : pour l'électricité, ils devront pouvoir supporter de la haute tension et pour le gaz, il faudra qu'ils soient parfaitement étanches afin de prévenir les fuites. Il faudra aussi prévoir la longueur afin qu'ils ne soient pas, d'une part trop court, mais aussi pour ne pas se retrouver avec un enchevêtrement de câbles/tuyaux à la fin du montage.
- Deux tapis isolants : Un sera placé sous la platine et le second sous le chariot à roulettes. Etant donné que l'on utilise de la Haute Tension, même si on reste avec un courant faible, ce n'est pas sans risques pour l'utilisateur. Il faut donc isoler à la fois la platine, mais aussi le manipulateur du sol, afin de prévenir ces risques. Il n'y a pas de tapis isolants dans les versions de base. Nous en préconisons un car il s'agit juste de prendre plus de précaution sécuritaires vis-à-vis des étudiants, qui manipuleront l'expérience en novices.

### c. Schéma électrique détaillé

Le schéma électrique est relativement simple, puisqu'il ne comporte qu'un générateur, un boîtier de résistances, et des électrodes. La difficulté intervient dans le passage dans la cloche à vide, lequel se fait à l'aide de connecteurs circulaires spécial haute tension.

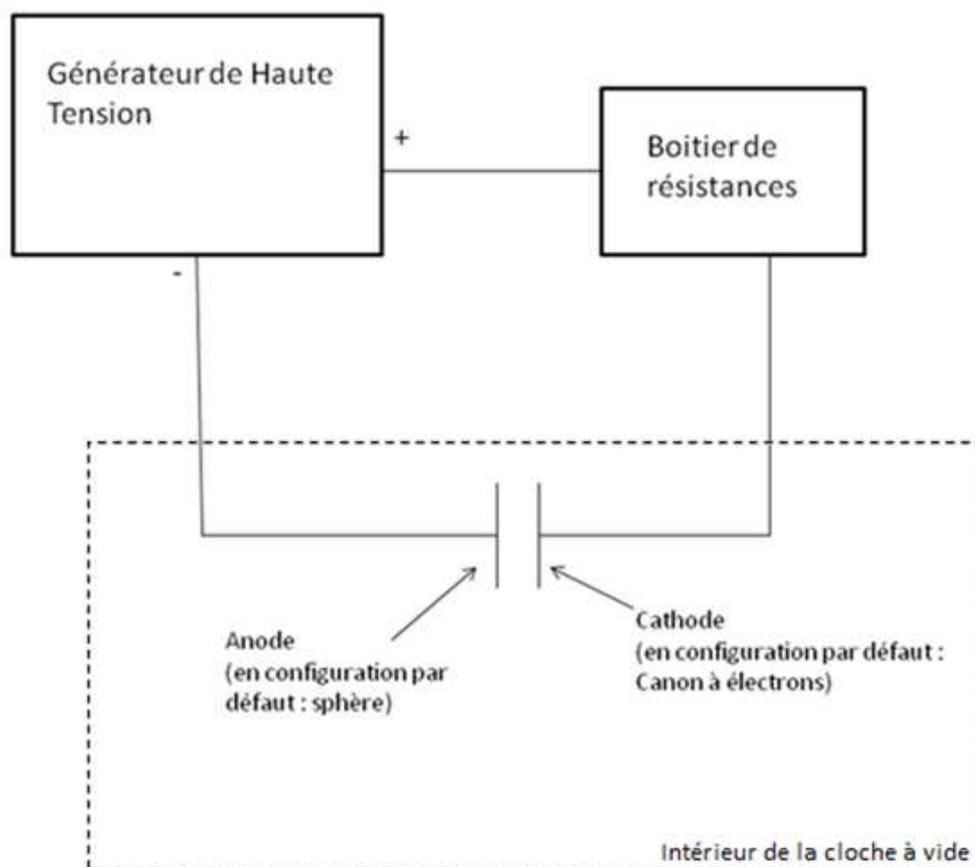


Figure 10 : Schéma électrique du montage

Tout d'abord, on place des résistances en série avec le générateur de Haute Tension afin de réduire autant que possible l'intensité du courant dans le système. Ensuite, on utilise les sphères et le canon à électrons comme des électrodes. En configuration dite « par défaut », où on considère que le vent solaire vient percuter la magnétosphère terrestre, le canon est la cathode et l'une des deux sphères est branchée en anode sur l'application.

Cependant, il reste possible de permuter ces positions, d'utiliser uniquement les deux sphères, etc... Pour plus d'aisance, on peut utiliser un boîtier commutateur à l'entrée/sortie de la cloche à vide, afin de permuter facilement ces positions sans avoir à démonter l'ensemble du système pour tout recâbler.

## 2) Sécurité HT

Etant donné que de la Haute Tension est utilisée lors de cette expérience, des mesures sécuritaires doivent être prises.

Ainsi, des résistances sont placées en série avec le générateur afin de minimiser au maximum l'intensité du courant et donc de réduire les risques pour l'utilisateur. De plus, des tapis isolants seront placés sous l'expérience, afin de réduire le risque d'électrocution. Malgré cela, il y a une procédure de sécurité à prendre en compte afin de ne blesser personne et de ne pas endommager le matériel.

Tout d'abord, malgré le fait que des tapis isolants sont disposés sous la platine et sous le chariot, il est recommandé de ne pas toucher la platine lorsque le générateur est sous tension. Une solution pour augmenter la sécurité serait de relier la platine à la terre, ce qui limiterait cependant le déplacement du chariot.

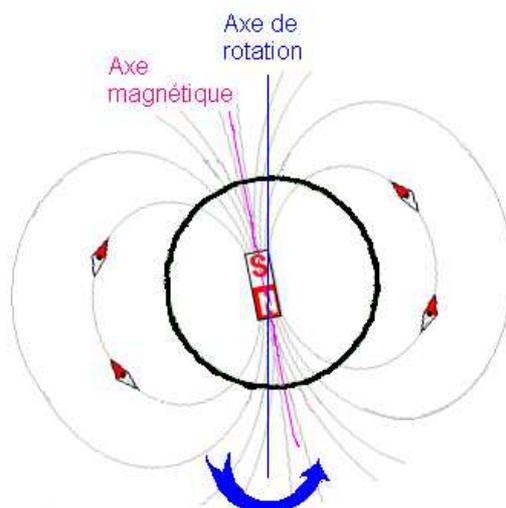
Ensuite, il ne faut pas toucher au boîtier de commande de configuration lorsque l'alimentation est sous tension. Cela pourrait créer des arcs électriques et mettre en danger l'utilisateur. Il ne faut pas non plus mettre d'objet métallique autre que les sphères ou le canon à électrons sous la cloche, ce qui perturberait le champ magnétique, fausserait les mesures et risquerait de créer des arcs électriques sous la cloche, ce qui pourrait gravement endommager le matériel d'une part, et porter atteinte à la santé de l'utilisateur d'autre part.

Il faut s'assurer que l'alimentation est coupée et que la pression est normale avant de démonter la cloche. Dans le cas contraire, cela risquerait fortement d'endommager les composants et l'utilisateur prendrait des risques pour sa santé (électrocution, rayonnements UV, etc...). Et vice versa, il faut remonter la cloche AVANT de remettre en route l'alimentation. C'est pourquoi nous conseillons aux élèves de toucher le moins possible aux configurations des objets dans la cloche. Ainsi, la cloche n'est pas ouverte, et cela limite les risques. Dans ce sens, un sujet de travaux pratiques sera axé sur telle ou telle configuration.

### 3) Solutions techniques

Nous exposerons dans cette partie les solutions techniques des modifications que nous apportons à l'expérience. Quelques modifications sont traitées dans ce chapitre, toutes n'ayant pas encore été solutionnées à ce jour. Nous parlerons donc de la rotation des sphères, afin de représenter la rotation des planètes sur elles-mêmes, puis la translation verticale des sphères, qui permettrait de visualiser l'influence de la distance Planète-Soleil sur la force des phénomènes magnétiques. Cette deuxième modification n'est pour l'instant pas compatible avec la précédente. C'est pour cela que nous privilégions la rotation, puisque c'est une modification bien moins coûteuse, et l'effet produit est bien plus intéressant à étudier. Nous évoquerons aussi deux autres modifications : le changement de gaz dans la cloche, qui permettrait d'observer le jeu de couleurs, et donc d'étudier la manipulation d'un point de vue spectroscopique ; la dernière modification est la translation de la buse, encore non solutionnée, qui permettrait de s'affranchir de la modification "changement de hauteur des sphères", puisqu'elle aurait le même effet.

## a. Rotation



*Figure 11 : Représentation schématique de la sphère, avec ses axes magnétique et de rotation*

L'effet que nous voulons représenter est la rotation d'une planète sur elle-même. La solution évidente vient toute seule : l'utilisation d'un moteur pour faire tourner la sphère. Mais cela soulève plusieurs problèmes. En effet, la sphère, en matériau conducteur, est reliée à un pôle du générateur. Si l'on fait tourner la sphère, le câble d'alimentation de la sphère s'enroule autour de l'axe de rotation. Evidemment, pour palier à ce problème, il suffirait de faire tourner dans un sens, puis dans l'autre. Mais cela rajouterait une contrainte, et l'effet visuel recherché réside peut-être dans une rotation régulière et durable dans un même sens de rotation.

Nous avons trouvé une solution à ce problème : faire tourner l'aimant à l'intérieur de la sphère. En effet, la sphère étant parfaitement lisse, sa rotation ne présente aucun intérêt. Ce que l'on souhaite faire tourner, finalement, c'est le champ magnétique de la sphère. Or, le champ magnétique découle de l'aimant. On positionnerait donc l'aimant sur une tige, de manière inclinée (il n'y a aucun intérêt à le faire tourner s'il est parfaitement vertical). Cela sous-entend, bien sûr, de percer la sphère. De plus, il faudrait pouvoir faire varier l'inclinaison de l'aimant. Nous n'avons pour l'instant pas trouvé de solution propre, notre idée est donc de fixer l'aimant sur la tige à l'aide de pâte à coller de type Patafix®. Ainsi, cela réduirait la vibration (la pâte étant un matériau souple, elle encaisserait les vibrations), et ce serait facile d'usage.

De cette manière, il n'y aurait plus le problème de l'enroulement du câble autour de l'axe de rotation. En revanche, la rotation ne serait pas visible, puisque la sphère est opaque. Le phénomène reste visible, bien entendu, lorsque la Planetterella est en route.

## 1- Solution évidente : moteur électrique à courant continu

L'idée est ici d'utiliser un moteur électrique, avec lequel on ferait tourner l'aimant. Ceci est délicat, car il est impossible de placer le moteur à l'extérieur de la cloche, sous peine de casser le vide. Une protection est donc nécessaire, afin de limiter les interférences électriques et magnétiques. Celle-ci n'a pas besoin d'être très complexe, puisqu'un simple boîtier de plastique est suffisant. Il faudra veiller à ce que ce boîtier soit bien isolant, qu'il n'y ait pas de faille.



Le principal défaut des moteurs à courant continu, même de petite taille, est qu'ils fournissent une très grande vitesse de sortie. Il nous faut donc envisager un système de réduction mécanique entre la roue moteur et l'axe de rotation de l'aimant. Nous utiliserions des petits engrenages coniques en plastique. Leur coût varie entre 0.60€ et 4€ la pièce.

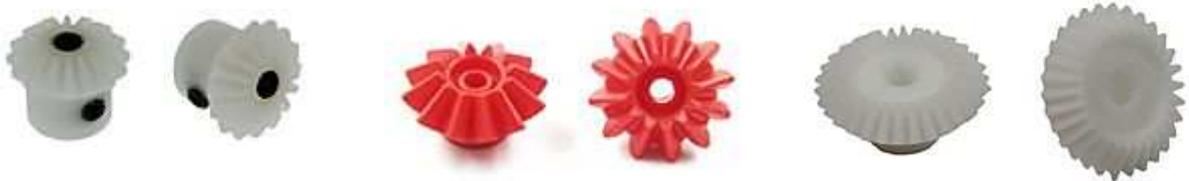


Figure 12 : Quelques exemples d'engrenages coniques en plastique

À l'aide de quelques engrenages de ce type, nous créerons une roue de réduction, permettant de diminuer considérablement la vitesse de rotation de l'aimant.

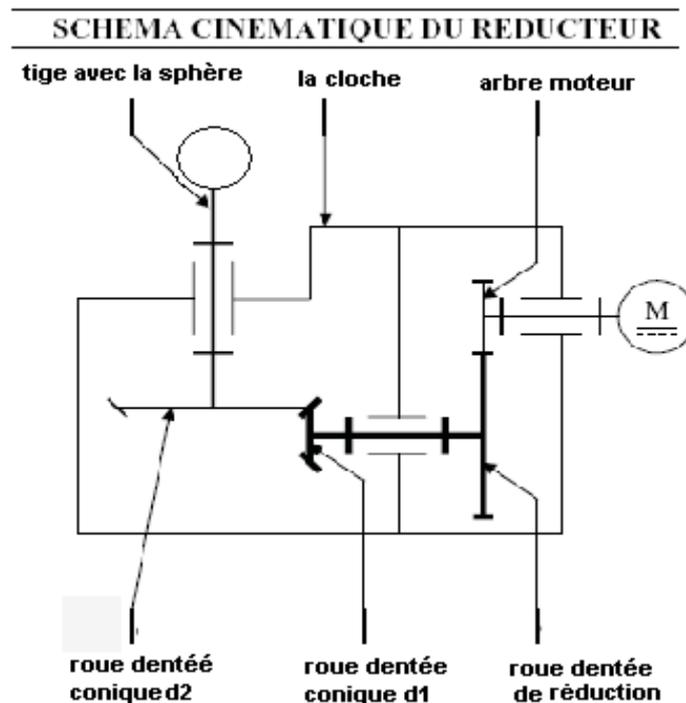
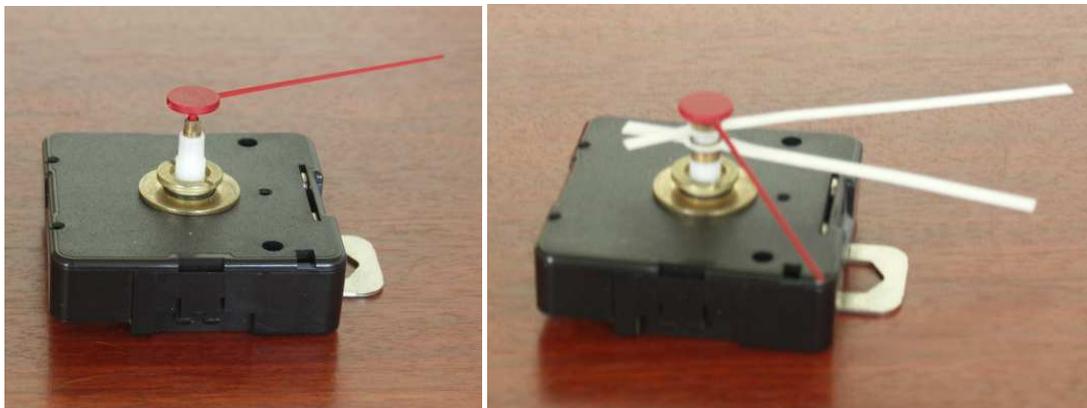


Figure 13 : Schéma cinématique du réducteur entre le moteur et l'aimant

Grâce à ce réducteur, la vitesse angulaire est grandement diminuée, mais cela reste insuffisant (si l'on veut rester dans des proportions relativement petites). On veut vraiment une vitesse toute petite, sans quoi nous n'aurons pas le temps de visualiser quoi que ce soit. Il faut se dire, qu'à l'échelle du système solaire, la terre fait un tour complet sur elle-même en une journée, soit avec une vitesse angulaire de 0.000073 rad/s. Le Soleil, quant à lui, fait un tour en 27 jours, il a une vitesse angulaire de 0.0000027 rad/s. Evidemment, on ne veut pas de si petites vitesses, mais il ne s'agirait pas non plus d'avoir une vitesse de plus de 2 tours / seconde.

## *2- Solution alternative : horloge mécanique*

Une autre solution, beaucoup plus simple, réside dans l'utilisation d'un mécanisme d'horloge mécanique. En effet, la trotteuse (aiguille des secondes) d'une horloge tourne très lentement. Il suffirait donc d'utiliser cette rotation pour faire tourner notre aimant.



*Figure 14 : à gauche un boîtier d'horloge mécanique avec ses aiguilles, à droite uniquement la trotteuse*

L'idée serait de retirer les aiguilles, pour ne garder que la trotteuse. Trotteuse dont on ne garderait que la pastille rouge que l'on peut voir sur la figure 14. Nous fixerions sur cette pastille une tige en plastique, qui serait l'axe de rotation, à l'aide de colle forte.

Au niveau de la charge maximale que peut admettre la trotteuse, tout en continuant de tourner, nous avons fait des essais. Nous avons mesuré cette donnée sur un boîtier mécanique personnel, et la trotteuse continue de tourner en supportant une masse de 50 grammes. Nous pensons que c'est largement suffisant pour une tige (en plastique) et un petit aimant.

Avantages de la solution « mécanisme d'horloge » :

- C'est une solution très bon marché (quelques euros).
- Le boîtier ne prend que peu de place.
- L'installation est facile : il n'y a pas besoin de beaucoup de savoir faire, pas de calculs, il suffit de fixer l'axe et l'aimant.
- L'installation est rapide, contrairement à la solution précédente.

Inconvénients de la solution « mécanisme d'horloge » :

- La rotation se fait pas à pas. Ce n'est pas forcément un problème, mais si l'on cherche la fluidité, elle risque de ne pas être au rendez-vous.
- La rotation s'effectue (à juste titre) dans le sens horaire uniquement, impossible de le changer.

De plus, si l'on met le boîtier, avec sa pile, directement dans la cloche, on est confronté à un problème supplémentaire : la rotation ne s'arrête pas ! De ce fait, au lieu de mettre la pile directement dans le boîtier et ce de manière quasi définitive, nous pourrions brancher des fils aux électrodes du boîtier (à l'aide de pinces crocodiles), faire passer ces câbles par le connecteur, et enfin le brancher en sortie à un générateur de courant continu (1,5 V).

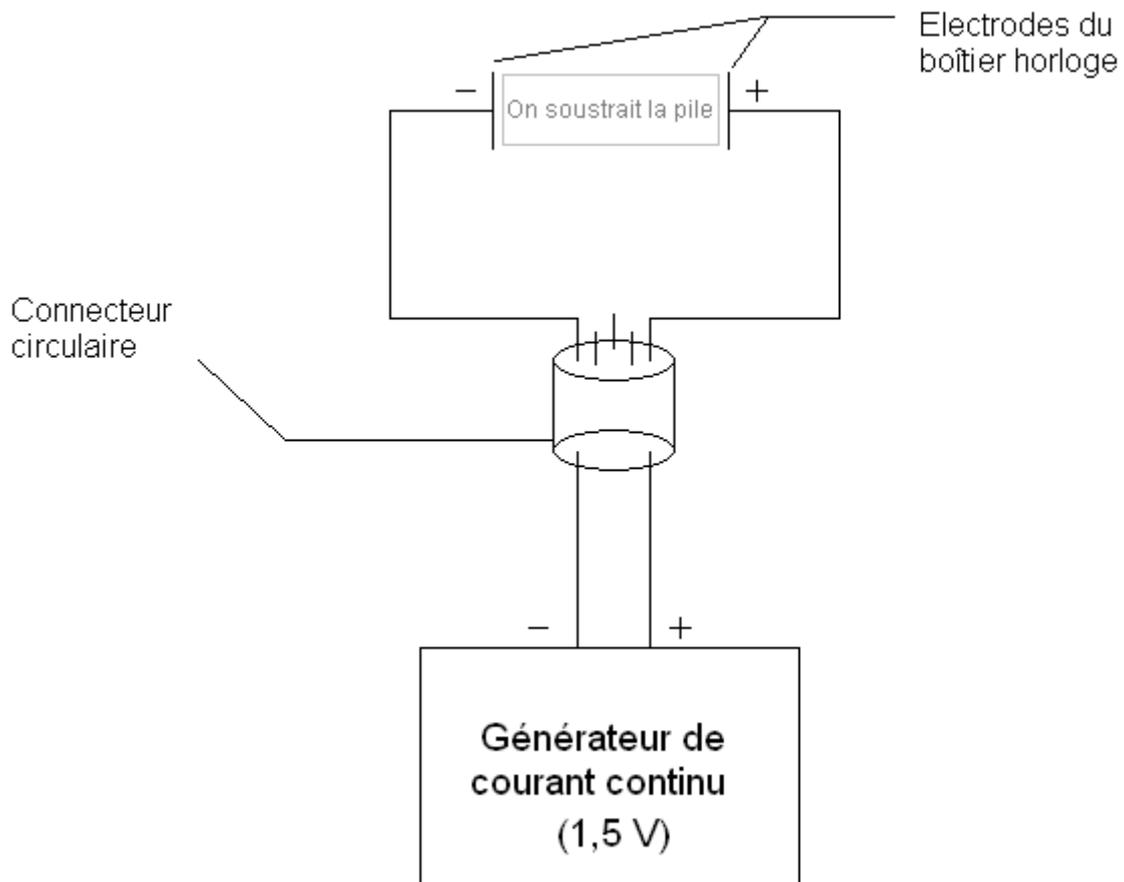


Figure 15 : Schéma de câblage du boîtier horloge

Ainsi, on peut contrôler la rotation de l'extérieur. Il suffit d'éteindre le générateur si l'on souhaite arrêter la rotation. Ceci réduit considérablement les inconvénients de cette solution, et en fait, probablement, la plus intéressante.

Nous n'avons à ce jour pas encore vérifié que le mécanisme d'horloge (moteur à courant continu) résistait au vide, c'est un point à vérifier impérativement.

## b. Changement de gaz sous la cloche

Nous avons eu l'idée de modifier le gaz à l'intérieur de l'enceinte. En effet, le gaz se trouvant sous la cloche avant que le vide ne soit fait peut impliquer des changements de couleur au niveau des aurores.

Le procédé est extrêmement simple et nécessite peu de moyens. Il faut cependant modifier légèrement la platine pour pouvoir appliquer ce changement : il faut ajouter un trou dans celle-ci afin de pouvoir procéder à l'injection de gaz. Le principe consiste à saturer la cloche avec le gaz voulu avant de faire le vide. Ainsi, en fonction du gaz utilisé, les résultats seront différents.

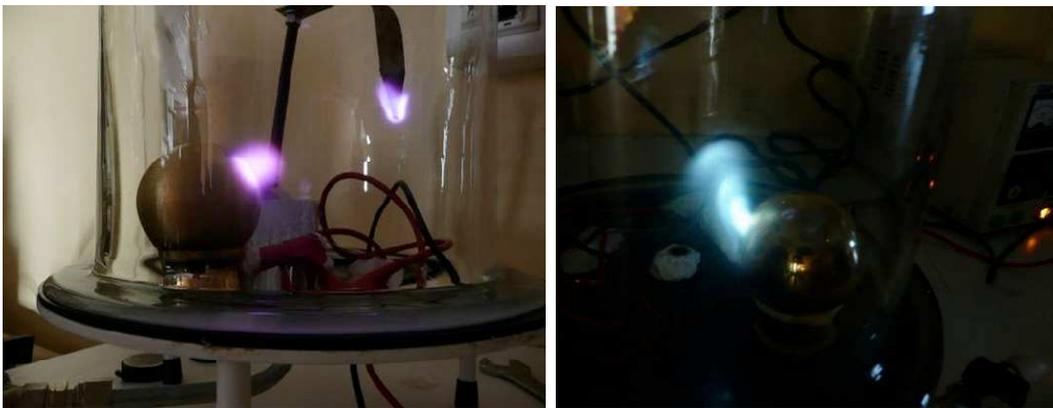


Figure 15 : A gauche, une Planeterrella « alimentée » avec l'air que nous respirons, A droite, on utilise du dioxygène pur.

## c. Translation verticale des sphères

Afin de faire varier la distance Soleil-Planète, nous avons pensé à faire monter ou descendre les sphères dans la cloche. La question était de savoir comment modifier la hauteur des sphères sans avoir à démonter systématiquement la cloche. Il fallait donc utiliser un système pouvant être piloté depuis l'extérieur.

Le principe consiste à utiliser une antenne télescopique commandée par un moteur (comme une antenne de radio de voiture par exemple). L'antenne serait placée dans le socle en plexiglas (lui aussi télescopique) de la sphère, et isolée des perturbations magnétiques grâce à une « chaussette » extensible en silicone. En montant, l'antenne entraînerait la sphère avec elle, et en redescendant, le socle se replierait simplement grâce au poids de la sphère.

Le moteur de l'antenne serait placé sous la platine, et il faudrait cependant percer celle-ci afin de permettre la liaison antenne/moteur (les fuites seraient empêchées grâce à un joint).

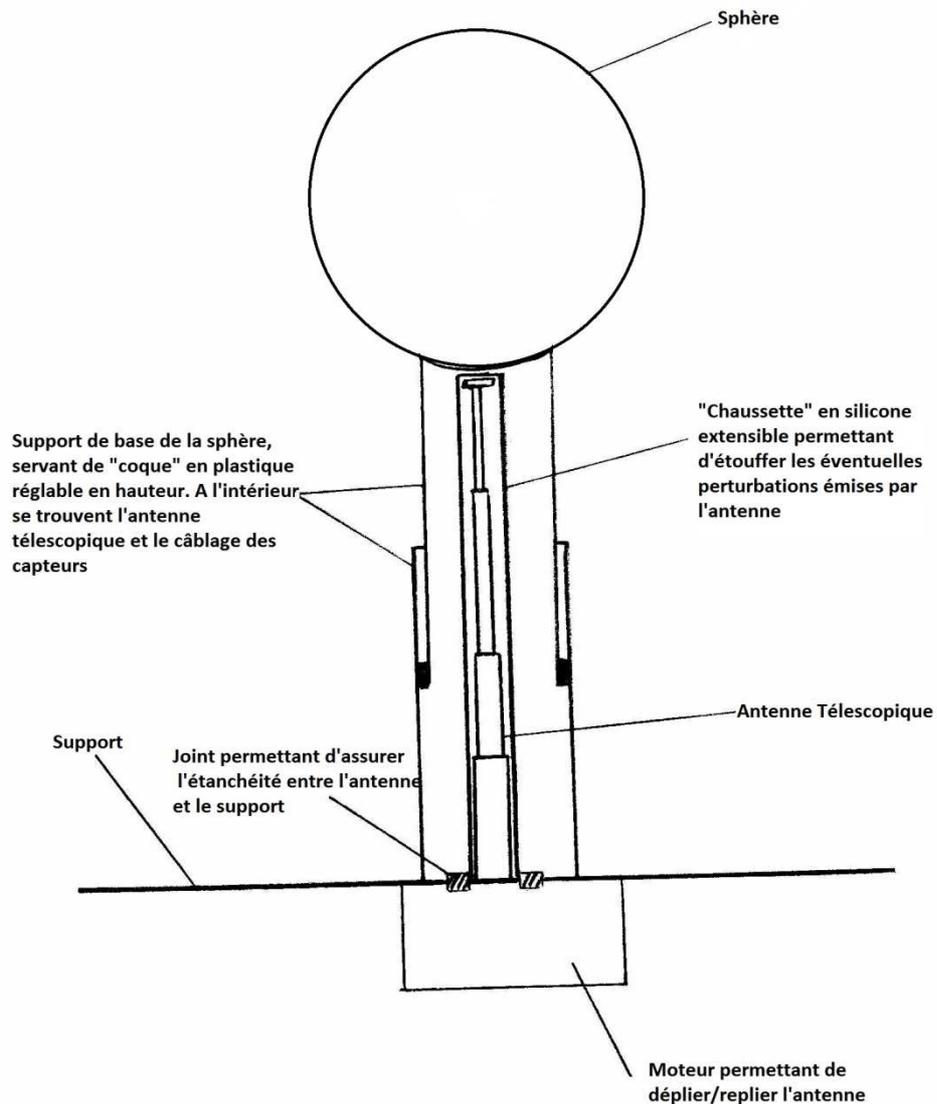


Figure 16 : Schéma explicatif de la solution "Translation verticale des sphères"

Le principal inconvénient serait qu'on ne pourrait plus déplacer les sphères latéralement, à cause des emplacements dans la platine prévus pour la liaison antenne/moteur. De plus, le dit moteur risquerait d'engendrer des perturbations magnétiques au système. Cette solution a donc été écartée.

#### d. Translation de la buse / non solutionné

Cette modification permettrait, elle aussi, de faire varier la distance Etoile-Planète de l'extérieur. Bien entendu, il est possible de changer la buse de place, mais il faut pour cela ouvrir la cloche, c'est donc contraignant. Notre idée serait de permettre cette rotation de l'extérieur, sans avoir à casser le vide. Plusieurs idées nous sont apparues, mais aucune n'est vraiment réalisable.

La solution qui a le plus retenu notre attention est celle qui consiste à placer la buse sur un rail en caoutchouc (tels ceux que l'on trouve pour les jeux de construction pour enfants, comme la marque Lego®), et de faire coulisser le rail dans un sens ou dans l'autre à l'aide d'une poulie, commander de l'extérieur. Dans le même style, nous pouvons imaginer un système comme ceux que l'on peut voir sur les stores - à l'aide de deux ficelles, on fait monter ou descendre le store. Ces deux solutions, très semblables, ont en commun leur faible coût et leur absence de faisabilité. En effet, si l'on fait un système mécanique manuel comme ceux-ci, il nous faut un raccord mécanique entre l'intérieur de la cloche et l'extérieur, ce que l'on ne peut faire sans casser le vide. Il faut donc trouver une solution pour faire ce raccord tout en maintenant la pression dans l'enceinte. C'est une idée à creuser davantage, la solution se cache sûrement sous nos yeux.

#### 4) Utilisation des arcs électriques

Un arc se produit quand un isolant subit une très forte différence de potentiel. À partir d'un certain seuil (tension disruptive ou de claquage) les électrons sont amenés à entrer en contact avec le isolant (ex : Air) et arracher des électrons à la matière. Les électrons arrachés sont alors attirés par l'anode et excitent la matière qu'ils rencontrent sur leur passage en arrachant d'autres électrons, on parle alors du phénomène d'avalanche, et l'isolant devient conducteur.

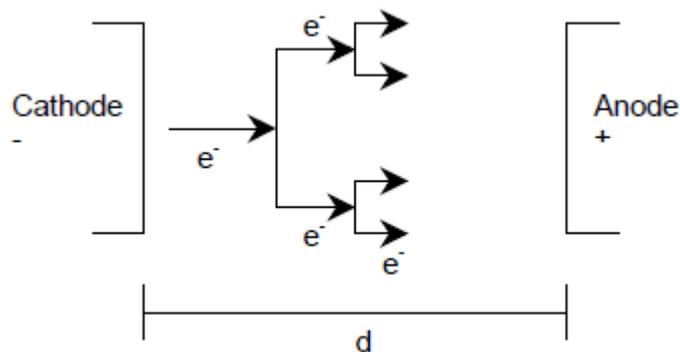


Figure 17 : schématisation de création d'un arc électrique

La partie visible est due à l'émission de photons des atomes qui retournent à l'état fondamental après avoir été ionisés par le courant les traversant.

##### *Quelques exemples d'utilisation des arcs électriques*

- La foudre est un arc électrique de grandes dimensions qui permet l'écoulement des charges électriques entre les nuages ou entre ces derniers et la terre.
- Les lampes à décharge utilisent les propriétés des arcs électriques pour la production de lumière (éclairage public, projecteurs, etc.).
- La soudure électrique à l'arc produit une grande quantité de chaleur localisée engendrant la fusion des matériaux, ce qui réalise des liaisons résistantes après refroidissement.
- Les fours à arcs sont utilisés en métallurgie pour la fusion des métaux.

L'amorçage d'un arc électrique entre deux contacts qui se séparent est l'une des techniques utilisées dans les disjoncteurs à haute tension pour obtenir la coupure d'un courant. L'interruption du courant est obtenue en refroidissant l'arc en le soufflant ou en le faisant tourner rapidement.

La découverte des principes régissant ce phénomène est due au chimiste et physicien anglais sir Humphry Davy en 1813. Son explication fait appel à une physique très complexe.

La position d'un arc électrique est stable : une fois qu'il a trouvé le chemin le plus court, il continue de l'emprunter (ce chemin est en effet celui qui demande le moins d'énergie). Toute la difficulté pour une soudure à l'arc est donc de maîtriser l'arc d'un mouvement continu pour lui faire garder la forme voulue même si la surface émettrice (ou plus rarement réceptrice) est parfois un angle aigu.

Un courant traversant un arc électrique est généralement intense et variable. C'est pourquoi un arc électrique cause de fortes perturbations électromagnétiques. Un capteur électrique peut difficilement trouver sa place à proximité.



### a. Quel intérêt ?

Nous avons vu en cours de techniques du vide un point important : la loi de Paschen. C'est elle qui détermine, en fonction de la distance entre les deux électrodes, de la tension à faire passer entre elles pour créer un arc électrique. Nous pourrions visualiser la chose, et ainsi étudier en Travaux Pratiques cette loi, la faisant déterminer aux étudiants. Ce serait un travail très intéressant puisque simplement visuel, qui leur permettrait de mieux appréhender la loi de Paschen.

De plus, cela ouvrirait les horizons de la manipulation, puisqu'elle ne servirait plus seulement à visualiser les phénomènes magnétiques astrophysiques, mais aussi des arcs électriques. Cela justifierait son investissement.

### b. Solutions techniques : enlever les boules / canon

Nous ne pouvons évidemment pas nous permettre de faire apparaître des arcs électriques directement sur les sphères, cela les abîmerait très rapidement et ce, définitivement. Notre solution serait plutôt de remplacer les boules et le canon (qui, rappelons-le, sont vissées et facilement démontables) par des électrodes, qui serviraient de base aux arcs électriques. C'est une solution très peu coûteuse, puisque de simples carrés de métal peuvent très bien faire l'affaire pour de telles électrodes.

## 5) Listes du matériel nécessaire

Pour monter la manipulation, il faut du matériel commun, que l'on utilise déjà à l'IUT, et du matériel spécifique, qu'il faudra faire sur mesure (comme par exemple les sphères, la cloche en plexiglas, etc.) D'un point de vue économique, il serait en effet judicieux d'utiliser du matériel déjà « existant » dans nos locaux, plutôt que de racheter l'ensemble des composants au prix fort. C'est pourquoi nous avons fait deux listes : celle du matériel disponible à l'IUT, que nous pourrions utiliser dans notre manipulation, et celle du matériel pour lequel il faudra dans tous les cas investir.

### a. Matériel disponible à l'IUT

Nous avons fait le tour du matériel éventuellement récupérable à l'IUT et établi une liste de celui-ci. Sachant quels composants étaient présents à l'IUT, nous ne savions pas pour autant si ceux-ci pouvaient être empruntés pour fabriquer la Planeterrella. Ainsi, renseignements pris, nous avons pris en compte le fait qu'une partie de ce matériel pourrait être utilisé mais uniquement durant une certaines périodes, le souci étant que certains dispositifs sont utilisés dans le cadre de l'enseignement.

Ci-dessous, la liste du matériel que nous avons pu trouver dans nos locaux, ainsi que sa « disponibilité » :



- Une pompe à vide : Solution temporaire. En effet, cette pompe est déjà utilisée en TP de mécanique des fluides, et il semble que la déplacer d'une manipulation à l'autre ne soit pas évident (il n'est pas facile d'avoir des connexions hermétiques avec les tuyaux).

- Un générateur Haute Tension : Solution Temporaire. Le problème est le même que pour la pompe à vide. Le générateur disponible est déjà utilisé en TP de Physique. Il s'agirait donc de faire correspondre les emplois du temps, afin de ne pas effectuer les TP de la Planeterrella avec ceux qui utilisent le générateur en physique.





- Un chariot à roulettes : pour pouvoir déplacer la manipulation facilement. Il faut cependant qu'il soit assez grand et qu'il comporte plusieurs plateaux pour disposer les éléments de la manipulation.
- Les connectiques pneumatique et électrique : pour la connectique électrique, il faudra s'assurer qu'elles soient faites pour supporter la haute tension. Il faudra peut-être cependant racheter des connecteurs si jamais ceux-ci sont utilisés sur un TP.

## b. Matériel à acquérir

Dans la mesure où nous ne savons pas pendant combien de temps le matériel sera disponible à l'IUT - problèmes de correspondance de plannings de TP -, nous avons préféré faire comme si tous les composants étaient à racheter.

Par ailleurs, nous pouvons sans aucun doute affirmer que les câbles seront toujours disponibles, c'est pourquoi nous ne les avons pas comptés dans le listing. Au besoin, leur prix reste négligeable par rapport à celui des autres composants.

### 1- Tarifs

Ci-après le tableau comprenant le tarif des composants, ainsi que leur fournisseur. Vous pouvez trouver le site internet des fournisseurs en bibliographie. Pour les tarifs, nous nous sommes basés sur les devis déjà effectués pour les Planeterellas existantes.

<b>Composant</b>	<b>Caractéristiques</b>	<b>Fournisseur</b>	<b>Prix</b>
Pompe à vide	Capable de générer un vide jusqu'à $10^{-2}$ Pa Modèle proposé : PPM2021SD	Adixen	1350€
Alimentation à Haute Tension	10kV	Systèmes Didactiques ELWE & LD Didactic	900€
Cloche à vide	Plexiglas – Volume 50 litres	Technico-Plast	600€
Platine de support	Aluminium	Technico-Plast	600€
Pied de sphère Ø50	Plexiglas	Technico-Plast	190€
Pied de sphère Ø100 (modifié)	Plexiglas	Technico-Plast	250€
Potence	Plexiglas	Technico-Plast	340€
Sphère Ø50	Aluminium	Technico-Plast	270€
Sphère Ø100	Aluminium	Technico-Plast	350€
Stylet		Technico-Plast	60€
Support + écrou stylet	Plexiglas	Technico-Plast	160€
Colonnnette sphère Ø50	Plexiglas	Technico-Plast	40€
Colonnnette sphère Ø100	Plexiglas	Technico-Plast	40€
Appareil de mesure de pression		Oerlikon Leybold Vacuum France	430€
Capteur de mesure de pression		Oerlikon Leybold Vacuum France	330€
Aimants permanents	Terres rares (Néodyme)	Radiospares	20€
Tapis isolant	1000*600mm – on en prendra 2 pour couvrir plus de surface. Isole jusqu'à 26.5kV	Seton	90€ l'unité
Connecteur circulaire	Modèle proposé : JAEGER - 536408006 - EMBASE MALE HERMETIQUE 8 CTS	Farnell	59€

## 2- Bilan Budgétaire

La totalité du devis revient à un montant de 6173€. C'est, certes, un investissement, mais il sera vite rentabilisé, au vu de ses utilisations nombreuses et variées en Travaux Pratiques.

### III. Utilisation concrète en Travaux Pratiques

Cette manipulation est très intéressante car elle est visuelle. Elle permet de voir les effets magnétiques au travers de phénomènes spectroscopiques, elle est donc utile dans de nombreux domaines de la physique. Elle s'insère facilement tout au long du programme de travaux pratiques de l'IUT Mesures Physiques, puisqu'elle peut servir en magnétisme en 1<sup>ère</sup> année, ou encore en spectroscopie en 2<sup>ème</sup> année, en optique, ou enfin en électricité en 2<sup>ème</sup> année, en utilisant les arcs électriques. Bien entendu, la pratique de l'expérience nécessite une pièce noire, sous peine de ne rien voir du tout. De tels emplacements sont nombreux dans les salles d'optique, ça ne devrait donc pas poser de problème d'insérer la Planeterra dans un des box.

#### 1) Magnétisme (1<sup>ère</sup> année)

La Planeterra permet de visualiser des phénomènes astrophysiques magnétiques. Nous pouvons l'étudier du seul point de vue magnétisme, sans rentrer dans les détails au niveau astrophysique. C'est une expérience très visuelle, donc dans le cadre du TP elle serait tout simplement la bienvenue, elle permettrait d'illustrer les cours de magnétisme, et d'égayer la séance de TP déjà prévue en magnétisme. Grâce à cette manipulation, on peut faire apparaître très facilement le champ magnétique d'un aimant - ou bien d'une planète.

Les cours de magnétismes sont prévus au programme de 1<sup>ère</sup> année, l'expérience s'intégrerait donc dans le TP déjà existant de magnétisme. Il ne s'agirait pas de comprendre en profondeur le mécanisme en jeu lors des phénomènes astrophysiques magnétiques, mais simplement de visualiser les effets du magnétisme, et ainsi s'approprier l'expérience, qui servira dans d'autres travaux pratiques le long du cursus (notamment en 2<sup>ème</sup> année). Nous pensons donc faire un sujet "découverte de la Planeterra", qui durerait une demi-heure, et qui reprendrait l'essentiel des manipulations pouvant être faites sur la machine. Les étudiants de 1<sup>ère</sup> année sont parfaitement aptes à comprendre ce qu'il se passe dans l'enceinte, ainsi ils pourront répondre à des questions d'ordre spectroscopique, grâce à leurs bases en atomistique.

De cette manière, les étudiants seront familiarisés avec l'expérience, ils sauront s'en servir pour les futurs TP, et ils auront un peu mieux compris le fonctionnement des aurores polaires.

## 2) Electricité : arcs électriques (2<sup>ème</sup> année)

Friedrich Louis Carl Heinrich Paschen (1865 - 1947) est un physicien allemand, principalement connu pour ses travaux sur les décharges électriques. En 1889, il établit la courbe de Paschen utilisée en physique des plasmas, selon la loi qui porte également son nom, la loi de Paschen.

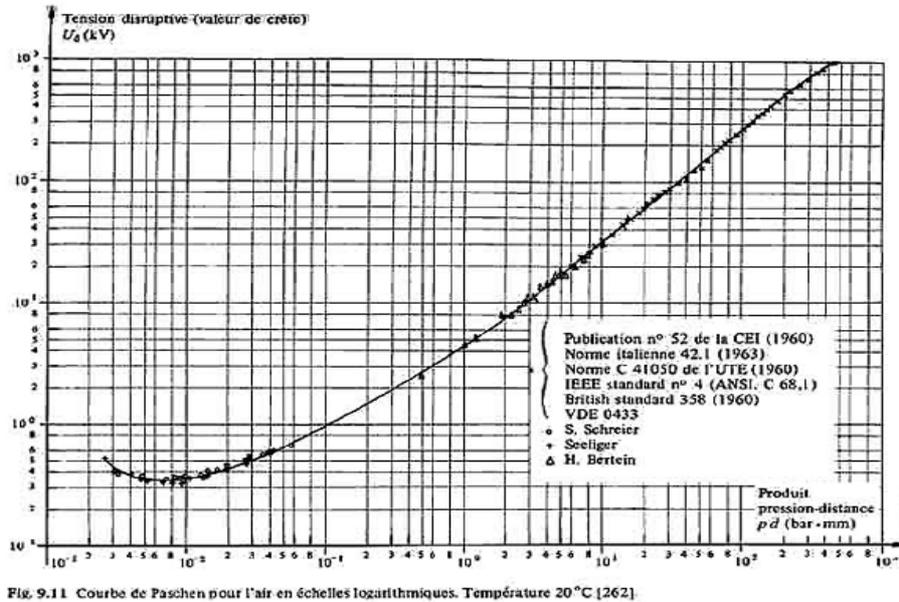


Fig. 9.11 Courbe de Paschen pour l'air en échelles logarithmiques. Température 20°C [262].

Figure 18 : Courbe de Paschen

Cette courbe est décrite par  $V = \frac{B(p d)}{\ln(A p d) - C}$  la loi : dans un milieu où l'isolant est un gaz

Où

$$B = \left( \sigma \frac{V_i}{KT} \right) \quad K = \left( \sigma \frac{\ln 2}{KT} \right) \quad C = \ln \left( \ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right) \right)$$

V : Tension entre les électrodes

$\sigma$  : Section efficace de contact avec les électrons

$V_i$  : tension d'ionisation du Gaz

K : constante de Boltzmann (1.3807 J/K)

T : la température du milieu

p : pression dans la cloche

d : distance entre deux électrodes

$\gamma$  : probabilité d'extraction d'un électron secondaire de la cathode (2ieme ionisation de Townsend)

Si on considère que le gaz dans l'enceinte est un gaz parfait :  $PV = nRT$

$$P = \frac{nRT}{V} \quad \left( \sigma \frac{V_i}{KT} \right) p d = \left( \sigma \frac{V_i}{KT} \right) \times \frac{nRT d}{V}$$

D'où : et sachant que :

La température étant la même l'équation se simplifie par T et donc dans la loi de Paschen la seule variable est le produit ( $p \cdot d$ ).

$$V_i = \ln(2)B/A$$

Si la pression est élevée entre deux électrodes (trop de matière isolante) les électrons ont plus du mal à passer vers l'anode depuis la cathode (C'est plus difficile de traverser une pièce si elle est remplie avec des gens et des meubles).

En revanche si la pression est trop basse il n'y a pas suffisamment de matière à exciter. Les électrons arrachés à la cathode traversent l'espace entre les électrodes mais ils sont inobservables car en trop petite quantité n'arrivent pas à déclencher le phénomène d'avalanche.

La tension de claquage minimale de la courbe de Paschen pour l'air est de 300-400V à la pression atmosphérique. Sachant que l'on va travailler avec des pressions beaucoup plus basses la tension de claquage va grandement diminuer (il est même possible de se passer de la HT).

Pour un arc à courant continu, l'électrode (à l'origine en charbon) positive est toujours placée à la partie supérieure et il se creuse à son extrémité un cratère, petite dépression en forme de calotte sphérique concave, qui est portée à incandescence. C'est le cratère qui produit la plus grande partie (85 %) de la lumière émise par l'arc. L'électrode négative placée au-dessous forme une pointe émoussée qui se recouvre de nodosités ; elle est portée au rouge et produit environ 10 % de la lumière émise. L'arc lui-même, c'est-à-dire les vapeurs situées dans l'espace compris entre les deux électrodes fournit environ 5 % de la lumière émise. L'arc doit être disposé de manière que le cratère soit tourné vers la surface à éclairer et l'électrode négative doit être la plus mince possible, afin de former un écran minimum pour la lumière produite par le cratère. L'arc reste très instable aux variations de tension ou de courant.

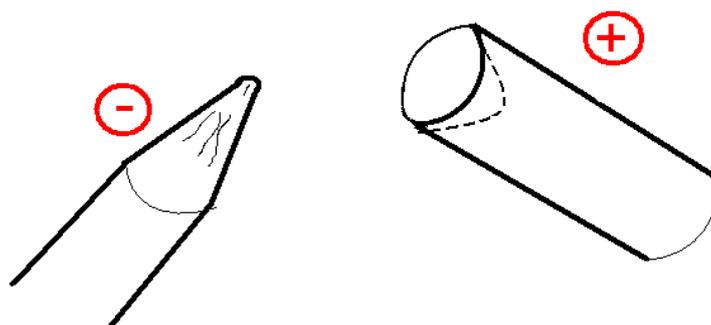


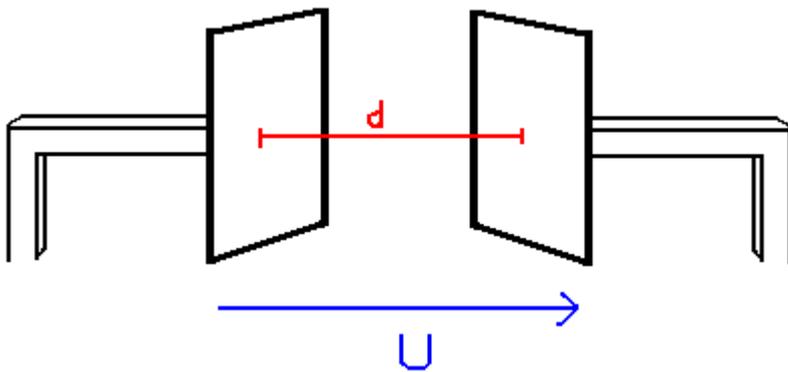
Figure 19 : Schéma de principe des électrodes à arcs électriques

L'étude d'un arc électrique ouvre une vue d'ensemble de leur création et de leur application :

- soudure à l'arc.
- éclairage.
- production des plasmas.

-la compréhension du phénomène.

La réalisation des mesures peut être faite avec des électrodes de différentes formes géométriques :



Deux plaques qui vont nécessiter une grande différence de potentiel pour produire un arc

Figure 20 : Schéma de montage avec deux électrodes plates

Deux électrodes en forme de pointe :

La tension de claquage sera inférieure à celle du cas précédent.

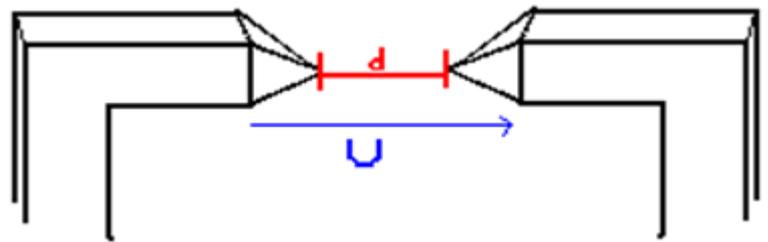
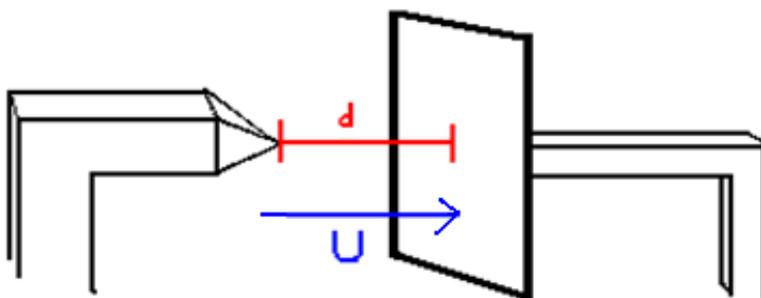


Figure 21 : Schéma de montage avec deux électrodes

*en forme de pointe*

Et enfin une plaque et une pointe permettant de mettre en évidence l'effet de pointe. L'effet de pointe peut être assimilé à un paratonnerre qui protège les installations et les bâtiments contre des coups de foudre.



(On peut avoir une quatrième configuration en inversant la polarité des électrodes de ce cas là)

Figure 22 : Schéma de montage avec une électrode pointe et l'autre plaque

Pour les trois configurations d'électrodes on fait varier la tension entre elles (la distance peut être fixe et la même pour les trois configurations) et on diminue la pression, ainsi on connaît les variables  $U$ ,  $d$  et  $p$ . Il suffit de prendre plusieurs points  $U=f(p,d)$ . Les utilisations sont nombreuses : on peut par exemple calculer par un système de trois équations à trois inconnues les constantes  $A$ ,  $B$  et  $C$ . Il est

nécessaire de calculer ces coefficients expérimentalement, au moins dans un premier temps, car il est impossible d'avoir des bons coefficients  $\sigma$  et  $\gamma$ .

En effet après les travaux réalisés par Elisa BARISONE et par SCHROETER Raphaël, les coefficients de la loi de Paschen doivent être déterminés expérimentalement car ils sont propres à chaque gaz et très complexes à calculer théoriquement. La tension d'ionisation pour un gaz est déterminée par la relation  $V_i = \ln(2)B/A$

Un arc provoque des perturbations magnétiques donc les mesures précises sont irréalisables dans ces conditions. Cependant il est intéressant de les visualiser via une sonde pour comprendre leur comportement.

Or, la création de l'arc n'est pas le seul point marquant de cette expérience :

En effet il est aussi intéressant de voir la production de lumière entre les électrodes avec un autre gaz (ex : Hélium, Argon, Krypton). La couleur de lumière produite va dépendre de la nature du gaz. Ainsi on étudie le principe d'éclairage des lampes à arc comme les tubes à néon.

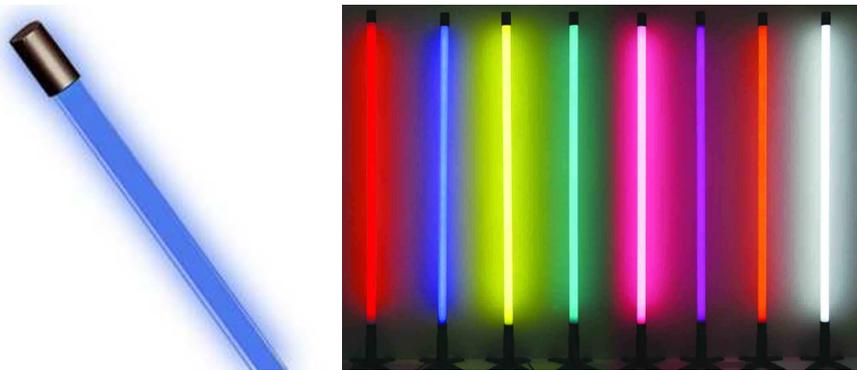


Figure 23 : Des tubes à néon

Si on change le gaz dans la cloche, on peut apercevoir une fluorescence du milieu ionisé, exactement comme il est possible de voir une différence de couleur des aurores boréales en changeant de gaz.

L'étude peut être faite sur la quantité de gaz dans l'enceinte et sur la tension appliquée nécessaires pour créer de la lumière sans qu'il n'y ait d'arc.

### 3) Physique / Optique / Techniques spectroscopiques (2<sup>ème</sup> année)

Du fait que la Planeterra est une application en grande partie visuelle, nous avons pensé à des possibilités d'utilisation en Travaux Pratiques d'optique et de spectroscopie.

D'une part, pour les élèves de première année, il pourrait être envisageable de créer un TP d'optique. En effet, il pourrait être intéressant de prendre des mesures d'intensité lumineuse, de changement de couleur ou d'autres phénomènes en fonction de paramètres comme la tension imposée à l'entrée du système, du gaz utilisé sous la cloche, etc... Les possibilités dans ce domaine restent nombreuses et pouvoir étudier les aurores polaires de cette manière peut s'avérer être intéressant pour les étudiants.

En outre, on peut étudier les arcs électriques en optique. En effet, avec les éclairs il est intéressant de placer une fibre optique au niveau de l'apparition de l'arc afin de visualiser l'intensité émise pour des différentes longueurs d'onde comme cela était réalisé en TP d'optique en première année pour des différents types de lampes à éclairage. De même, on visualise la superposition des différentes longueurs d'ondes pour une couleur. Encore une fois le changement de gaz dans l'enceinte est intéressant, car on peut apercevoir une modification des intensités et des longueurs d'ondes (changement de couleur). Pour que cela soit réalisable il faut choisir un connecteur circulaire qui est adapté pour recevoir une fibre optique. Il est aussi possible de placer un appareil photo qui prenne une image à l'instant de l'apparition de l'arc ou même qui prenne plusieurs photos à très haute résolution (Ou une camera vidéo suffisamment rapide) pour visualiser un arc dès l'apparition jusqu'à la fin de la décharge.

D'autre part, pour les secondes années, nous avons pensé à la possibilité de mettre en place un TP de techniques spectroscopiques. En effet, si l'on envisage la possibilité de changer de gaz sous la cloche à vide (cf. section « améliorations »), il pourrait aussi y avoir la possibilité de procéder à des mesures afin de déterminer les proportions tel ou tel de gaz dans un mélange, par exemple. Malheureusement, il y'a le souci de faire passer les sondes sous la cloche sans casser le vide qui n'a pas encore été résolu, et de plus, ce genre de mesure nécessite des lampes-étalons dont le coût s'avère être élevé.

## Conclusion

Nous avons apporté à ce dossier l'ensemble des connaissances que nous avons pu acquérir sur la Planeterrella, ainsi que les possibilités d'évolution auxquelles nous avons pensé. Cependant, dans l'éventualité où ce projet serait repris par la suite, il reste encore des tests à faire sur la viabilité de ces évolutions, et il en reste encore certainement d'autres que nous n'avons pas pu résoudre, ou même seulement envisagées.

Nous avons pu nous rendre compte au cours de ce projet que la Planeterrella est une application qui permet beaucoup de possibilités et qui peut apporter des connaissances dans plusieurs domaines de la physique. De plus, c'est une application qui a l'avantage d'être « visuelle », ce qui permet de se rendre compte directement de certains effets du magnétisme ou des propriétés des gaz.

De plus, nous avons pris beaucoup de plaisir dans l'étude de ce projet et l'élaboration de ce dossier, qui nous a permis d'apprendre à gérer une étude technique avec les implications que cela peut avoir (définir un cahier des charges, établir un budget, etc...), à travailler en autonomie (sans dépendre du corps enseignant) et se répartir les tâches en fonction des compétences de chacun. Nous avons par ailleurs compris l'importance de la cohésion au sein d'un groupe de travail.

Pour finir, nous avons pu prendre connaissance de divers phénomènes physiques ainsi que de leur « fonctionnement », dont on ne peut pas nécessairement comprendre le principe sans ce genre d'étude.

## Glossaire

**Aurore australe** : aurore polaire présente au pôle Sud

**Aurore boréale** : aurore polaire présente au pôle Nord

**Aurore polaire** : partie visible des sous-orages magnétosphériques, cf. II. 1)

**Birkeland Kristian** : Physicien Norvégien (1867-1917), l'inventeur de la Terrella

**Buse** : cf. canon à électrons

**Canon à électrons** : dans la configuration initiale, cathode (reliée au pôle – du générateur), qui envoie des électrons, synthétisant le vent stellaire

**Ceinture de radiations de Van Allen** : zone toroïdale de la magnétosphère terrestre entourant l'équateur magnétique et contenant une grande densité de particules énergétiques. La rencontre de ces particules avec les molécules de la haute atmosphère terrestre est à l'origine des aurores polaires.

**Cloche à vide** : système permettant de simuler le vide dans un système fermé. Le principe consiste à aspirer l'air sous la cloche à l'aide d'une pompe.

**Etoile** (terme Planeterrella) : Electrode (indifféremment buse électrique ou sphère) connectée au pôle NEGATIF du générateur (cathode). Une étoile émet de l'électricité.

**Générateur de Haute Tension** : il s'agit plus à proprement parler d'un transformateur. La tension du secteur est récupérée puis amplifiée (dans notre cas, aux alentours d'1kV environ) et redirigée vers l'application.

**Ovale auroral** : partie visible de l'aurore polaire, en forme d'ovale, autour du pôle magnétique

**Planète** (terme Planeterrella) : Electrode (indifféremment buse électrique ou sphère) connectée au pôle POSITIF du générateur (anode). Une planète reçoit de l'électricité.

**Planeterrella** : expérience mettant en scène une ou plusieurs Terrellas, permettant de visualiser les phénomènes magnétiques et électriques spatiaux, tels que les aurores polaires

Le **plasma** décrit un état de la matière constitué de particules chargées (d'ions et d'électrons).

**Terrella** : Boule aimantée permettant de mettre en évidence le magnétisme terrestre (inventée par Gilbert, en 1600)

**Trous coronaux** : régions de faible densité magnétique, s'étendant au dessus de la surface stellaire

Le **vent solaire** est un flux de plasma constitué essentiellement d'ions et d'électrons qui sont éjectés de la haute atmosphère du Soleil. Pour les étoiles autres que le Soleil, on parle généralement de vent stellaire.

**Vide** : espace défini ne contenant que très peu de particules (aucune dans le cas du vide absolu) et dans lequel la pression est très faible (nulle dans le cas du vide absolu). Par exemple, dans le cas du vide primaire, on a une pression comprise entre 1000 et 1 mbar, tandis que pour un vide dit secondaire, cette pression oscille entre  $10^{-3}$  et  $10^{-7}$  mbar. Le vide absolu est ce vers quoi on cherche à tendre, mais il est actuellement physiquement impossible de l'atteindre.

## Bibliographie :

Henrio Carine – Les aurores polaires (2001)

<http://planetterrella.obs.ujf-grenoble.fr/accueil.php>

<http://www.meteo.org/phenomen/aurore.htm>

[http://www.phy6.org/earthmag/Grand\\_aimant/demagadd\\_fr.html](http://www.phy6.org/earthmag/Grand_aimant/demagadd_fr.html)

[http://www.lesia.obspm.fr/plasma/site\\_aurores\\_nouv/terrella.html](http://www.lesia.obspm.fr/plasma/site_aurores_nouv/terrella.html)

<http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Terrella>

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire>

<http://aep.unige.ch/old/html/labos2/paschen/schroeter.pdf>

[http://spiderman-2.laas.fr/GEET/COM2010/GE\\_Barisone.pdf](http://spiderman-2.laas.fr/GEET/COM2010/GE_Barisone.pdf)

<http://aep.unige.ch/old/html/labos2/paschen/schroeter.pdf>

### Sites internet des fournisseurs :

<http://radiospares-fr.rs-online.com/web/2978933.html#header>

<http://fr.farnell.com/jaeger/536408006/embase-male-hermetique-8-cts/dp/1418261>

<http://www.seton.fr/equipements-poste-tapis-isolant.html>

# Annexes

**TECHNICO-PLAST**  
16, rue Fernand Pelloutier  
38130 ECHIROLLES

Devis n° D8001079

Laboratoire d'Astrophysiq

TECHNICO

Echirolles le, 13/11/08

Cher Client,

Nous avons bien reçu votre demande de devis et nous vous en remercions.  
Nous vous prions de trouver ci-dessous nos conditions les meilleures sous la référence

Mr Couderc

Référence	Désignation	Qté	Px. unitaire	Remise	Montant HT
A	**** Pieds de sphère Plexi dia.100.	1,00	198,00		198,00
A	**** Pieds de sphère Plexi dia.50.	1,00	186,00		186,00
A	**** Une Sphère en 2 1/2 partie usinée et visée dia.100.	1,00	318,00		318,00
A	**** Une Sphère en 2 1/2 partie usinée et visée dia.50.	1,00	270,00		270,00
A	**** Une potence en Plexi.	1,00	340,00		340,00
A	**** Pieds support manip.	2,00	59,00		118,00
A	**** Stylet n° 2.	1,00	48,00		48,00
A	**** Stylet.	1,00	59,00		59,00
A	**** Tulipe de passage étanche.	1,00	92,00		92,00
A	**** Un embout pneurop nw40.	1,00	76,00		76,00
A	**** Ecrou de support Stylet.	1,00	59,00		59,00
A	**** Platine.	1,00	598,00		598,00
A	**** Support Stylet	1,00	102,00		102,00
A	**** Colonette sphère dia.100.	1,00	40,00		40,00
A	**** Colonette sphère dia.50.	1,00	40,00		40,00
A	**** Jonction conductrice sphère dia.100.	1,00	59,00		59,00

XXXXXX

Nous sommes à votre disposition pour tout complément d'informations.

Nous vous prions d'agréer, Cher Client, nos sincères salutations.

Mr Gratier.

Page 1

Téléphone : 04.76.09.33.70  
Télécopie : 04.76.09.07.02  
Courriel : technico-plast@wanadoo.fr

N° Siret : 07050094700018 N.A.F. : 2229A N° intracommunautaire : FR76070500947

Fax reçu de :

14/11/08 10:52 Pg: 1

Référence	Désignation	Qté	Px. unitaire	Remise	Montant HT
	Report	17,00			2 603,00 €
A	**** Jonction conductrice sphère dia.50.	1,00	59,00		59,00
A	**** Une cloche en Plexi.	1,00	592,00		592,00
PORT+_EMB	**** Port et emballage.	1,00	150,00		150,00

Délai: 4 semaines.

Total HT

3 404,00

Offre Valable jusqu'au : 14/12/08

Règlement par Chèque / Traite

Echéance : 30 Jour(s) net 10

Nous sommes à votre disposition pour tout complément d'informations.

Nous vous prions d'agréer, Cher Client, nos sincères salutations.

Mr Gratier.

Page 2

Téléphone : 04.76.09.33.70  
Télécopie : 04.76.09.07.02  
Courriel : technico-plast@wanadoo.fr

N° Siret : 07050094700018 N.A.F. : 2229A N° intracommunautaire : FR76070500947

Fax reçu de :

14/11/08 10:55 Pg: 2

## Systèmes Didactiques

Équipements pour l'enseignement expérimental, Scientifique et Technique



ELWE®

Systèmes Didactiques  
2 avenue du Vaularon  
F-91940 Gometz le Château  
Tél : 01 64 86 16 35, Fax : 01 64 86 16 36  
Xavier.Granjon@Systemes-Didactiques.fr; www.Systemes-Didactiques.fr

Physique, Chimie, SVT  
Génie électrique, Automatismes, Régulation, Télécommunications  
Génie Mécanique, Génie Thermique, Génie des Procédés, Mécanique des Fluides  
Mobilier de salles de manipulations

OBSERVATOIRE MIDI PYRENEES  
LABO D'ASTROPHYSIQUE  
M. Michel DUPIEUX  
14, rue Edouard Belin

31400 TOULOUSE

Offre N°.....: 14050-PRO- 019929  
Votre N°de cli:  
Votre réf.....:  
Resp. Secteur.: Mr. Xavier Granjon  
Téléphone.....: 01 64 86 16 35  
Fax.....: 01 64 86 16 36  
eMail.....: xavier.granjon@systemes-didactiques.fr  
Date .....: 17/03/09

Adresse de livraison:

M. DUPIEUX,

Suite à votre demande, nous avons le plaisir de vous faire parvenir l'offre de prix suivante:

Pos.	Qté.	N° de Cat.	Désignation	Prix unitaire EUR	Prix total EUR
1	1	52170	Alimentation Haute Tension 10 kv	901.00	901.00
Montant total HT					901.00
19.6% TVA de EUR				901.00	176.60
19.6% TVA de EUR				0.00	0.00
Montant total TTC					1 077.60

Conditions de livraison: Transport et emballage compris en France métropolitaine pour toute commande sup. à 800 EUR HT sauf mobilier et produits chimiques, Validité de l'offre: 4 semaines, Paiement: A réception de la facture, Délai de livraison: 6 à 20 semaines à réduire, Garantie: 12 mois

Nicole Saint-Léger  
Systèmes Didactiques ELWE & LD Didactic



by Alcatel Vacuum Technology

**Emetteur**  
Alcatel Vacuum Technology France  
98, avenue de Brogny  
BP 2069  
74009 Annecy Cedex  
FRANCE  
Tel : 33 (0)4 50 65 77 77  
Fax : 33 (0)4 50 65 77 89

INSU OBSERVAT. MIDI PYRENEES  
LABO D'ASTROPHYS. UMR 5572  
14 AVENUE EDOUARD BELIN  
31400 TOULOUSE  
FRANCE

Dossier suivi par : Claudine GARANDEL  
Tel : 0164864075  
Fax : 0164864071  
E-mail : claudine.garandel@adixen.fr

Attn : M. Michel DUPIEUX  
Tel : 05 61 33 28 80

E-mail : michel.dupieux@ast.obs-mip.fr

OFFRE

Page 1

N° 20092369 / Date 24.10.2008

Vos références :

Monsieur,

Conformément à votre demande, nous avons le plaisir de vous adresser ci-après notre meilleure proposition pour la fourniture suivante :

N°. POS	REFERENCE DESIGNATION	QTE	PRIX UNITAIRE HT	VALEUR TOTALE HT
			EUR	EUR
10	221SDMHEM PPM UM2021SD HT A120 EUR	1	1.350,00	1.350,00
	La PPM 2021SD est une pompe à palettes série PASCAL. Elle répond aux besoins de la plupart des applications industrielles courantes et non corrosives (centrifugeuses, production de tubes TV, vidage de tubes électroniques...).			
	La PPM 2021SD se caractérise entre autres par :			
	- un moteur monophasé universel (180-254 V 50/60 Hz / 90-132 V 50/60 Hz, norme UL / CSA / CE) configuré en haute tension, avec interrupteur M/A,			
	- un débit nominal de 20.7 m³/h (50 Hz),			
	- une pression limite totale lest d'air fermé (ouvert) de 2.10 <sup>-3</sup> mbar (10 <sup>-2</sup> mbar),			
	- une lubrification naturelle, permettant de réduire au minimum les émissions de brouillard d'huile,			
	- un anti-retour intégré, assurant la protection du système sous vide,			
	- un dispositif de lest d'air,			
	- une bnde d'aspiration et de refoulement en DN 25 ISO-KF,			
	- un poids de 28 kg et des dimensions de L 483 x l 164 x h 240 mm,			
	- une charge d'huile minérale A120.			
20	068372	1	208,00 20,00%-	166,40

Web Site: [www.adixen.fr](http://www.adixen.fr) - e-mail: [contact@adixen.fr](mailto:contact@adixen.fr)  
Siège social : 12, rue de la Baume - 75008 Paris - France  
S.A.S. au capital social de 9424000 EUR - 085 980 357 R.C.S. Paris  
Id. Intracom. FR 41 085 980 357

N° POS	REFERENCE DESIGNATION	QTE	PRIX UNITAIRE HT	VALEUR TOTALE HT
	FLEXIBLE INOX L1000 DN25KF		EUR	EUR
<b>Montant HT :</b>				<b>1.516,40 EUR</b>

**CONDITIONS DE VENTE**

**REMISE**

POSTE 1 : PRIX TOUTES REMISES DEDUITES

**DELAI A CE JOUR**

5 semaines ouvrées à réception de commande ferme

**TERME DE VENTE**

Conditions valables pour une livraison en France métropolitaine uniquement :

Franco de port à partir de 230 Euros HT d'achat.

Forfait transport de 23 Euros pour toute commande < 230 Euros.

**CONDITIONS DE PAIEMENT**

60 jours fin de mois

**TAXES**

TVA en vigueur en sus

**GARANTIE**

Un an pièces et main d'oeuvre

**VALIDITE DE L'OFFRE**

30.12.2008

Cette offre est soumise à nos conditions générales de vente (disponibles sur demande).

Nous vous remercions pour l'intérêt que vous portez à nos produits et restons à votre entière disposition pour tous renseignements complémentaires.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur, nos meilleures salutations.

Gilles RICHIER  
TEL 04 50 65 74 30

N° d'ident.: FR41702029976

Oerlikon Leybold Vacuum France S.A. / F-91942 Courtaboeuf

**Offre de Prix**

A mentionner dans tout courrier et paiement

N° d'offre	N° de compte	Date
20144268	110226	27.10.2008

Votre interlocuteur: Lysiane KREMIN  
Tél.: 0169824823, Fax: 0169075739

Page: 1/ 3

CNRS  
LABORATOIRE CHIMIE DE COORDINATION  
ROUTE DE NARBONNE 205  
F-31077 TOULOUSE CEDEX 4

N° d'ident.: FR40180089013

Monsieur DUPIEUX - Tél : 05 61 33 28 80 - Email : michel.dupieux@asf.obs-mip.fr

Monsieur,

Comme suite à votre entretien avec M. Ph. BEUSCART, nous vous proposons selon nos conditions générales de vente :

Position	N° de catalogue	Quantité	Désignation	Prix unitaire EUR	Prix total EUR
00010	230001	1	<b>Display One</b> Appareil électronique de mesure de pression une voie de mesure pour les capteurs transmetteurs THERMOVAC TTR / PENNING/VAC PTR90 Plage de mesure de 1000 à 5*10E-4 mbar Affichage digital Alimentation 100 - 240V Vac ,50/60 Hz Sortie enregistreur 0-10 V Lecture sélectionnable entre mbar,Torr ou Pascal	429,68	429,68
			Remise 20,00%	343,74	85,94- 343,74
00020	12426	1	<b>Câble de connexion type A</b> Câble électrique < 80 V Longueur 5 m, avec 2 prises FCC 68	67,54	67,54
			Remise 20,00%	54,03	13,51- 54,03
00030	230035	1	<b>THERMOVAC capteur transmetteur TTR 91</b> jauge de mesure de vide avec électronique, plage de mesure 5*10E-4 - 1000 mbar, filament Tungstène, alimentation 24 V DC, signal sortie 1,9 - 10 V log, bride de raccordement DN 16 KF	327,00	327,00
			Remise 20,00%	261,60	65,40- 261,60

Les livraisons et prestations de service sont effectuées sur la base des conditions générales imprimées au verso. La date d'exécution est conforme à la date du bon de livraison.

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 3 000 750 EUR

Régie par les articles 118 à 150 de la loi sur les sociétés commerciales.

Siège social: avenue du Québec, VILLEBON-SUR-YVETTE (Seine-et-

Marne) Cedex-Bois de la Chapelle 91010 Courcouronnes

N° SIRET 702 029 576 00054

Coordonnées bancaires: NATEXIS BANQUES POPULAIRES

DIRECTION GÉNÉRALE COMMERCIALE

ADMINISTRATIVE 7, avenue du Québec - B.P. 042

ZA de Courtaboeuf 1 - 91042 COURTABOEUF Cedex

Tél.: 01 69 82 48 00 - Téléc. Lit. Orsay 606852 F

Télécopieur: 01 69 07 57 38 - CCP Paris 3450 89 B

45, rue Saint-Dominique - 75007 Paris  
IBAN-FR: FR76 3000 7999 9904 1349 0600 011

LISINE 640, rue Aristide Bergès - B.P. 107

Zone Industrielle MARCROLES

29501 BOURG-LES-VALBONNE Cedex

Tél.: 04 75 82 33 00

Télécopieur: 04 75 82 02 69

30007 9999 04134906000 31

Position	N° de catalogue	Quantité	Désignation	Prix unitaire EUR	Prix total EUR
00040	18341	1	Collier serrage Element de raccordement en aluminium pour bride DN 10/16 KF	9,35	9,35
			Remise 20,00%	7,48	1,87-
					7,48
00050	18206	1	Anneau de centrage DN 16 KF Morceaux tubulaires en aluminium pour bride DN 16 KF matériau aluminium joint en FPM	6,20	6,20
			Remise 20,00%	4,96	1,24-
					4,96
Total des positions					671,81
Montant total H.T.					671,81

Délai de livraison:

3 à 4 semaines à réception de commande

Conditions de livraison: CIP TOULOUSE: Port et assurance payés

Paiement: Jusqu'au 15 du mois suivant sans déduction  
PAR VIREMENT A 45 DATE DE FACTURE

Nous sommes responsables pour les dommages assurés ainsi que pour ceux produits intentionnellement ou par imprudence.

Le commettant est responsable vis à vis de Oerlikon Leybold Vacuum du ferrailage en bonne et due forme des anciens appareils et se chargera de cette opération.

Garantie 12 mois.

Fin de validité le: 31.12.2008

Commercial: Yvon le Mat / SC  
Tél.: 0607325360, Fax: 0169075738