

Projet expérimental

Arthur Marguerite & Olivier Thouvenin



Printemps 2011

Table des matières

Présentation générale	4
I Introduction	5
II Montage	6
III Observations	8
III - 1 Ovaux auroraux	8
III - 2 Anneaux de courant stellaire	9
III - 3 Ceinture de Van Allen	9
III - 4 Jets stellaires	10
IV Intérêts	11
Difficultés expérimentales	13
I Travailler sous vide	13
II Créer un plasma et l'orienter	14
III Réaliser un spectre	16
Résultats et conclusions	19
I Sphère de Debye	19
II Interprétation des spectres	19
III Ce que l'on aurait pu faire	20

Présentation générale

I Introduction

Notre travail expérimental visait à créer un dispositif capable de recréer en laboratoire des aurores boréales. Ce dispositif est appelé planeterrella, et une première ébauche fût réalisée au début du XXème siècle par le Norvégien Kristian Birkeland. Elle a été améliorée récemment par le chercheur français Jean Lilensten, qui nous a très gentiment prêté une bonne partie du matériel donc nous avons besoin pour réaliser cette expérience. L'intérêt d'une telle expérience sera développée plus en détail dans la suite.

Nous tacherons tout d'abord de présenter le dispositif expérimental, puis nous développerons un peu de théorie, en présentant les différentes possibilités de la planeterrella. Enfin, nous présenterons les différents intérêts de cette expérience, tant d'un point de vue général que dans le cadre de ce module de physique expérimental. Tout d'abord, la première question à laquelle il faut répondre avant même de penser à réaliser une expérience est : quel est le phénomène qui se cache derrière les aurores boréales ? Il s'agit d'interactions entre les particules du vent stellaire et les particules de la haute atmosphère (au niveau de la partie supérieure de l'ionosphère située entre 150 et 800 kilomètres d'altitude). Sous l'action des particules de haute énergie venant du soleil, les particules de l'atmosphère s'ionisent, jusqu'à former un plasma qui émet dans le visible, en fonction de la nature chimique de la molécule excitée. Si les aurores boréales s'observent principalement dans la zone aurorale entre 65° et 75° Nord et Sud, la raison est à chercher plus haut en altitude au niveau de la magnétosphère (entre 800 et 1000 kilomètres d'altitude), où les particules du vent solaire sont piégées par le champ magnétique terrestre (ce sont des particules chargées, donc la force de Lorentz les pousse à suivre les lignes de champ), et sont contraintes à aller à l'endroit de la naissance de ces lignes de champ, comme l'illustre la photo 1. Il faut impérativement que ce changement de direction se fasse très haut en altitude, c'est-à-dire là où la densité de particules est très faible, car un nombre de chocs trop important aurait tendance à pousser les particules en dehors des lignes de champ. Dès lors, que nous faut-il faire pour réaliser des aurores boréales en laboratoire ? Il

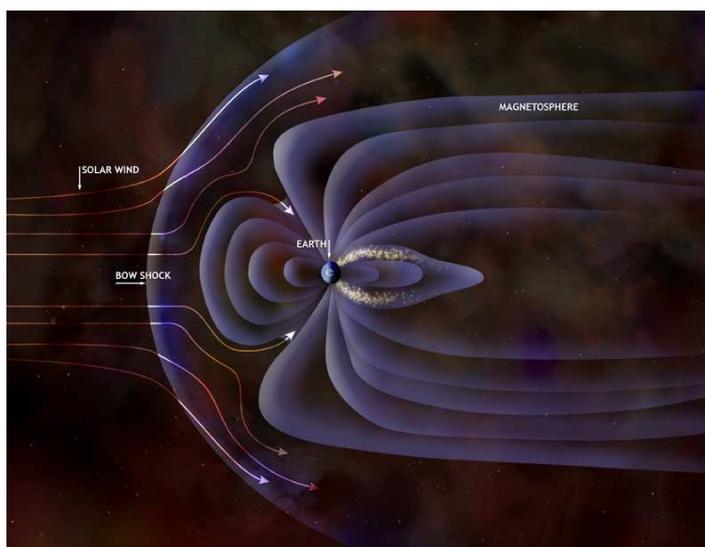


FIGURE 1 – magnétosphère

suffit de créer un plasma il est alors nécessaire de travailler sous vide pour que le potentiel d'ionisation ne soit pas trop élevé. On pourrait orienter le plasma grâce à un champ magnétique permanent, qui devra nécessairement être de forte intensité, car nous ne pouvons pas réduire la densité particulaire suffisamment pour empêcher qu'il

ne se passe un grand nombre de collisions, mais il suffit que les effets de la force de Lorentz reste non négligeables par rapport à la force induite par les chocs pour que le plasma s'oriente. Pour obtenir un champ magnétique suffisamment puissant, nous avons utilisé des aimants de Terre rare (en néodyme) d'intensité environ 400mT ! On s'attend alors à observer des aurores boréales, non pas celles que l'on a l'habitude de voir depuis la Terre, mais en changeant de point de vue, puisque cela revient à observer depuis l'espace, que nous pouvons observer grâce à des images prises par le satellite *Discovery* (voir figure 2).

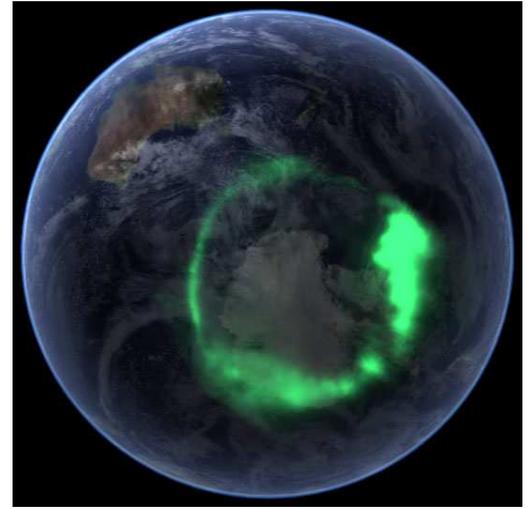


FIGURE 2 – images satellite prises par *Discovery*

II Montage

Les montages expérimentaux que nous avons utilisé pour réaliser cette expérience seront présentés ci-dessous. Nous avons débuté avec un premier montage, avec notre propre matériel. Malheureusement, le manque de matériel spécialisé (voir partie *Créer un plasma et l'orienter*) ne nous a pas permis de voir la formation d'un ovale auroral (figure 3).

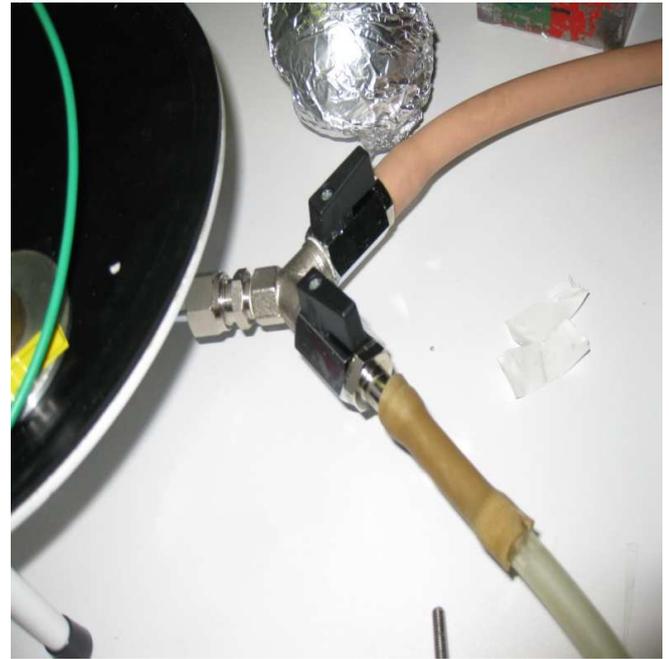


FIGURE 3 – Premier montage

C'est pourquoi, le chercheur Jean Lilensten de Grenoble, avec qui nous étions en contact, a accepté de nous prêter une partie de son matériel pour réaliser un deuxième montage, qui cette fois-ci, nous a permis de faire des observations intéressantes (figure 4). Un tel montage comporte 2 parties principales : Une enceinte à vide dans laquelle repose 2 sphères en aluminium respectivement de 5 et 10 cm de diamètre, posées sur des supports et reliés à des fils électriques. Elles joueront le rôle de planète ou d'étoile au cours de l'expérience, et contiennent des aimants en néodyme dans des configurations spécifiques à chacune d'entre elles. La plupart du temps, la petite sphère contiendra deux aimants collés l'un contre l'autre, dans une direction qui peut varier, et on verra ainsi un disque se former à l'équateur de la planète. La grosse sphère contient deux aimants opposés collés contre la paroi de la sphère. Les dispositions de ces aimants sont changeables à souhait.



FIGURE 4 – Second montage

Est également présent une buse électrique (une simple pointe métallique) pouvant servir de “canon à électrons“, elle aussi attachée à un support, et reliée à un fil électrique. Le tout est posé sur une platine. Dans le deuxième montage, tout ce matériel appartenait à Jean Lilensten. Un montage à vide reliant une pompe à vide à l’entrée de la platine, de manière la plus étanche possible. Nous sommes passé d’un système entièrement canalisé par du caoutchou à un système majoritairement en métal. Même si l’étanchéité n’était toujours pas excellente à la fin des séances, nous l’avons amélioré au fur et à mesure des séances. Ce montage intègre des dérivations pour insérer un capteur de pression et un bouchon (qui nous servait à contrôler grossièrement la pression, et aurait éventuellement pu nous servir pour insérer d’autres gaz dans l’enceinte à vide). En plus, nous avons installé un générateur pouvant aller jusqu’à quelques kiloVolts, pour former le plasma. Ce générateur est relié à un joint sur la platine permettant de faire passer quelques fils électriques, et alimente donc les sphères et la buse. Enfin, nous nous sommes servis au cours des séances de divers outils d’analyse optique et magnétique : deux spectromètres différents, un appareil de mesure de spectre par Jobin et Yvon, un goniomètre, une caméra CCD, diverses lampes spectrales, et une sonde à effet Hall.

III Observations

Toutefois, observer des ovales auroraux n’est pas la seule possibilité de la planeterrella, et nous allons tenter d’expliquer brièvement, au cours du paragraphe qui suit, les différentes configurations et possibilités que nous avons observé au fur et à mesure des séances de TP.

III - 1 Ovaux auroraux

Avec un montage semblable au deuxième que nous avons fait, pour des vides de l’ordre de 50 à 100 Pascals, on peut alors observer des ovales auroraux en branchant une des sphères à la cathode du générateur (joue le rôle d’une planète qui reçoit des électrons) et, soit la buse, soit l’autre sphère à l’anode (qui joue alors le rôle d’une étoile, qui émet des électrons). On peut alors observer, si le champ magnétique de la planète est bien aligné, deux ovales auroraux symétriques autour des deux pôles de la planète. Dans notre expérience, nous n’avons réussi qu’à obtenir un ovale sur un seul des deux poles à la fois, ce qui est sûrement dû à un alignement légèrement décalé de l’axe magnétique de la planète. En figures 5 et 6, nous présentons deux photos, une faite par un chercheur, où l’on peut voir les deux ovales auroraux, puis une de nos photos. Ces images sont à comparer avec les photos du satellite Discovery présentées à la figure 2.



FIGURE 5 – Ovaux auroraux obtenues par d’autres chercheurs

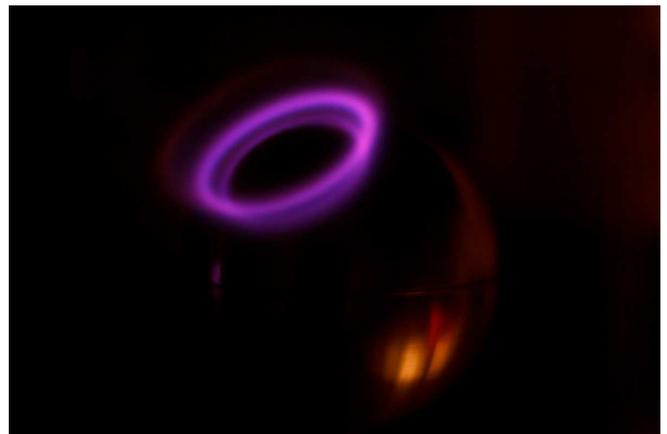


FIGURE 6 – Ovales auroraux obtenues à l’ENS

On peut faire remarquer que la couleur du plasma varie en fonction de la configuration, mais également et de façon notable en fonction de la pression, le plasma pouvant, se teinter d’une coloration rose intense pour les pressions les plus élevées (150 Pascals), en passant par le violet aux pressions intermédiaires, puis au violet-rose clair-laiteux (figure 5) plus on descend en pression.

III - 2 Anneaux de courant stellaire

Lorsque la petite sphère est reliée à l'anode, elle éjecte donc des électrons vers la cathode. Toutefois, une partie des électrons est piégée par le propre champ magnétique de la petite sphère, dont les 2 aimants sont collés l'un contre l'autre, ce qui fait que le champ magnétique entraîne les électrons non plus aux pôles mais à l'équateur magnétique zone de champ le plus intense. Ces électrons sont donc contraints à tourner autour de cette sphère et ionisent le gaz alentour, formant un plasma, appelé un anneau de courant stellaire. En changeant la direction des aimants dans la petite sphère (ce qu'on peut même faire depuis l'extérieur de la cloche!), on peut aisément, et de manière assez amusante voir l'anneau changer de position (figure 7).

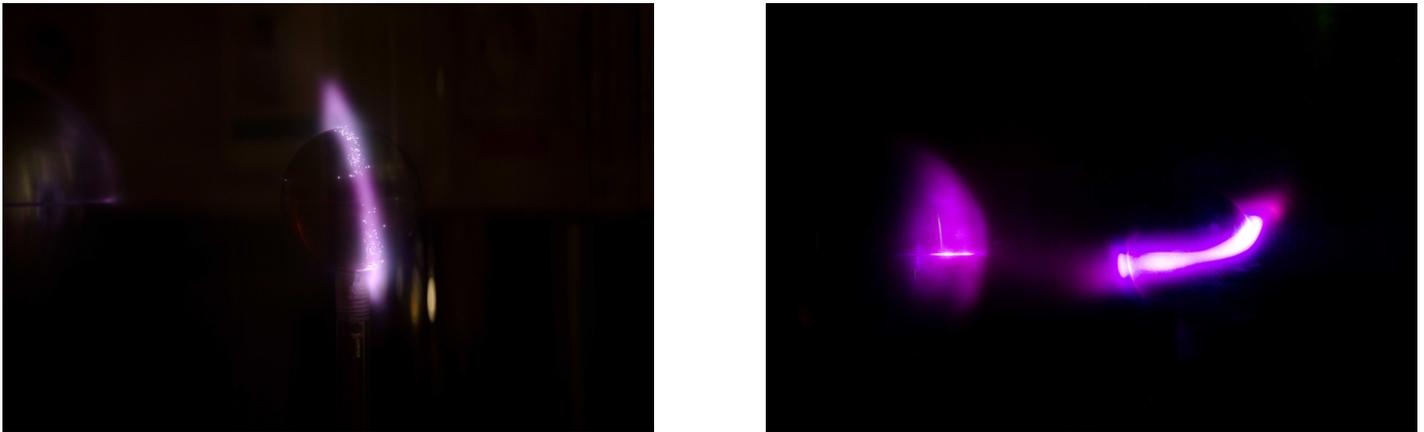


FIGURE 7 – Anneaux orthogonaux à l'axe principale de champ magnétique

III - 3 Ceinture de Van Allen

Dans le cas où la grosse sphère est une planète (donc reliée à la cathode), on peut également observer une zone de l'espace qui est relativement bien connue des astrophysiciens : il s'agit de la ceinture de radiation de Van Allen qui est la zone où les particules de haute énergie du vent solaire (ici, des électrons tirés par la buse) commencent à être attiré par le champ magnétique de la planète. Leur concentration devient soudainement plus forte et le nombre de collisions est alors suffisant pour émettre de la lumière de façon significative. Nous avons observé une partie de cette ceinture de radiation, mais nous n'avons pas de photos sur cette zone, et nous avons donc utilisé une de celle du site officiel de la planeterra (figure 8).



FIGURE 8 – Ceinture de Van Allen reproduite

III - 4 Jets stellaires

Lorsque la pression sous la cloche à vide est un peu plus forte (150 pascals environ) , on peut observer plusieurs phénomènes intéressants. Tout d'abord, il y a suffisamment de collisions pour voir apparaitre le trajet emprunté par les électrons. De plus, dans cette configuration, la plupart des électrons ne vont pas jusqu'à la cathode, mais sont renvoyés par le biais de collisions au niveau de l'étoile dont ils viennent d'être éjectés. Il se forme ainsi un cône de lumière, appelé jet stellaire (voir figure 9). Ce dernier n'a été observé par des satellites que très récemment au niveau d'étoiles que l'on pense devoir être très fortement magnétisées !



FIGURE 9 – Reproduction de jets stellaires

IV Intérêts

Cette expérience est intéressante selon de nombreux point de vue. Non seulement, elle peut être utile dans un cadre de recherche, mais est également très formateur dans le cas d'un TP de L3. Tout d'abord, il est intéressant de noter que le premier fondateur de la planeterrella, K. Birkeland s'est servi de son expérience pour démontrer dès le début du XXème siècle le mécanisme des aurores polaires, alors même que la notion d'électron venait juste d'être proposée par Thomson. Cette expérience permet donc de confirmer la théorie. Encore aujourd'hui, en plus d'être un outil de vulgarisation scientifique précieux (Une planeterrella devrait notamment voir le jour au Palais de la découverte d'ici peu.), cette expérience permet de redécouvrir un certain nombre de phénomènes spatiaux. De là à pouvoir faire des prédictions sur des situations encore jamais observées? Notamment, nous sommes capable d'observer ce à quoi devrait ressembler les aurores boréales sur la face nocturne d'Uranus (ce que nous ne pouvons observer avec des satellites), ce qui est intéressant sachant qu'Uranus a un champ magnétique orienté de façon très différente par rapport à la Terre! Toutefois, cette expérience est seulement qualitative, et nous ne sommes pas en mesure de dire que la planeterrella est un modèle miniature d'un système planétaire. Il reste tout de même tentant de croire qu'à force d'observations sur les différentes configurations de la planeterrella et sur des aurores boréales d'autres planètes, il serait possible de deviner la configuration du champ magnétique de la planète simplement en comparant avec une configuration semblable de la planeterrella. Sans aller aussi loin, nous pouvons faire remarquer que cette expérience fût assez enrichissante pour nous, puisqu'elle nous a permis de nous familiariser avec les contraintes qu'imposent une enceinte sous vide, qu'elle nous a poussé à mettre en avant certaines de nos facultés en optique, et qu'elle nous a fait découvrir le monde de la physique des plasmas, puisque la plus grande partie des mesures que nous avons effectués ont été des mesures relatives au plasma, et le fait d'orienter ce plasma n'a pas d'influence sur ces mesures.

Difficultés expérimentales

I Travailler sous vide

Pour ioniser l'air avec des différences de potentiel raisonnables, à savoir quelques centaines de kV , il fallait fortement diminuer la pression sous la cloche à vide. Nous avons choisi la pompe à vide qui avait le débit volumique le plus important : $78L.min^{-1}$ soit encore $1.3L.s^{-1}$ ceci bien sûr afin d'atteindre rapidement des pressions de l'ordre du millibar, pressions auxquelles le plasma commence à s'ioniser. La première cloche que nous avons utilisée avait un volume assez faible (quelques litres) et par ailleurs on pouvait directement la relier par un simple tuyau en caoutchou à la pompe. Elle était pratique d'utilisation et on pouvait espérer atteindre rapidement le millibar. Cependant, l'utilisation de tuyau en caoutchou était source de fuite notamment lorsque nous avons cherché à contrôler la pression en utilisant des manomètres que l'on reliait par un tuyau en caoutchou. (voir figure 4b) D'une part, nous observions le tuyau se comprimer sur lui même ce qui coupait le manomètre du reste de l'enceinte et faussait la mesure. D'autre part le manomètre ne pouvait pas indiquer des valeurs de pressions en dessous de la centaine de $mbar$ s ce qui est trop au dessus des valeurs que nous voulions atteindre. La cloche qui nous a été prêtée est plus volumineuse ($50L$) mais doit être relié à la pompe par des connectiques à "ultra-vide" ce qui limite les pertes et permet de connecter une jauge de pression (Pirani) adaptée à ces pressions. Nous avons donc un meilleur contrôle sur la pression sous la cloche. Nous pouvions aussi facilement la faire remonter légèrement à l'aide d'une vanne. De même la pompe pouvait être isolé à tout moment du reste de l'enceinte. Nous devons prendre des précautions concernant la propreté de l'enceinte et ce qu'elle contenait. Tout ce qui est susceptible de s'évaporer (les traces de sebum laissées par les doigts par exemple) ralentit la descente en pression car c'est autant de matière à pomper. Pour palier à ce problème il fallait nettoyer la cloche en plexiglass à l'eau et les surfaces métallique à l'éthanol, puis laisser sécher. Il fallait également manipuler ganté pour ne pas déposer plus de sebum ou de poussières. Malgré cela nous n'arrivions pas à obtenir une précision basse suffisamment rapidement pour être efficace. Il s'est avéré que la longueur du tuyau en caoutchou restant entre la pompe (qui ne pouvait pas être branchée autrement) et le reste de l'enceinte était un facteur déterminant. En effet c'est, de tout le montage, le canal au diamètre le plus faible ($7mm$) et donc qui limite le plus le débit de la pompe. D'après la loi de Poiseuille appliquée à un écoulement incompressible newtonien dans un tube, le débit volumique de fluide s'exprime :

$$D_v = \frac{R^4 \pi \Delta P}{8\eta L}$$

où ΔP est la différence de pression entre les deux extrémités du cylindre de longueur L et η la viscosité dynamique. Si on suppose donc que, juste à la sortie de la pompe l'aspiration est efficace et donc la pression relativement faible par rapport à celle de l'enceinte, on voit qu'un canal trop long (L grand) va limiter le débit volumique. L'aspiration étant diminuée la pression décroitra plus lentement. C'est effectivement ce que l'on a observé en coupant le tuyau pour le faire passer de $93cm$ à $16cm$. La figure I représente l'évolution (linéaire et logarithmique) de la pression dans l'enceinte en fonction du temps à partir du moment où l'aspiration commence. À partir de $400s$ soit en dessous de quelques $mbar$ on remarque une variation dans la décroissance. Pour modéliser l'évolution de la pression on peut partir de l'hypothèse de l'air comme gaz parfait encore raisonnable en début de manipulation. Le débit volumique de la pompe est supposé constant donc on peut écrire qu'entre l'instant t et $t + \delta t$ la pompe a retiré $\frac{n(t)}{V} D_v \delta t = \frac{P(t)}{k_b T} D_v \delta t$ particules. Donc on a :

$$P(t + \delta t) - P(t) = \frac{-P(t) D_v \delta t}{V}$$

où V est le volume de l'enceinte

$$\frac{dP}{P} = \frac{-D_v}{V} dt \qquad P(t) = P_0 e^{\frac{-D_v t}{V}}$$

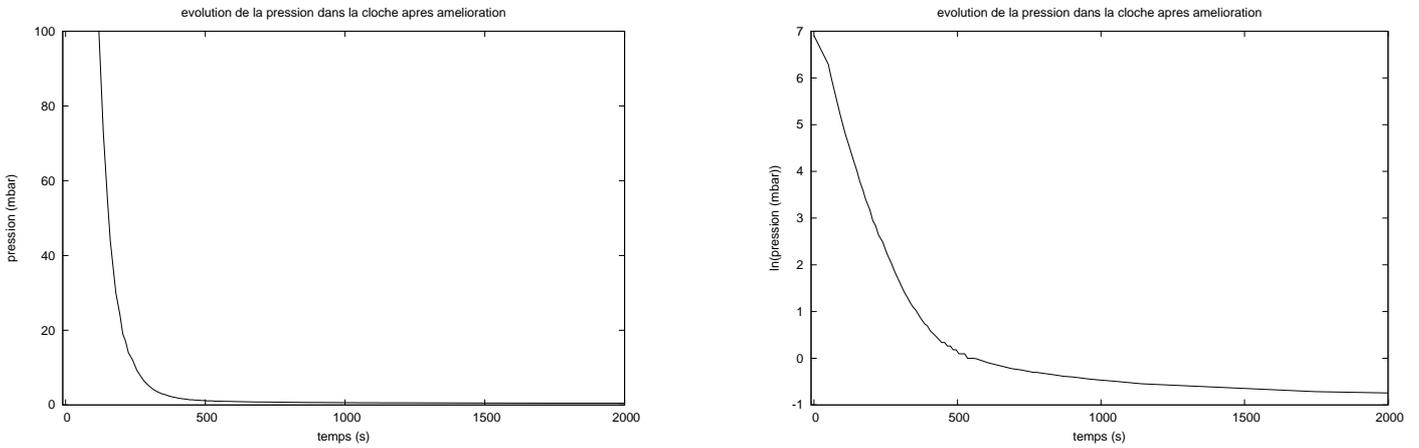


FIGURE 10 – évolution de la pression en fonction du temps dans l'enceinte

Cette décroissance logarithmique se retrouve bien sur la figure I b pour les temps inférieurs à 400s puisque l'on a sur l'échelle logarithmique une décroissance linéaire. En calculant le coefficient de cette pente on trouve $-1.6.10^{-2}s^{-1}$. Le constructeur indique un débit volumique de $78L.min^{-1}$ soit $1.3.10^{-3}m^3.s^{-1}$. Dans l'hypothèse large où on néglige le volume des canaux on s'attend expérimentalement à $\frac{-D_v}{V} = \frac{-1.3.10^{-3}}{0.050} = -2.6.10^{-2}s^{-1}$. Cet écart positif à la valeur du modèle s'explique par les volumes des canaux que l'on n'a pas pris en compte et par le débit volumique qui a probablement une valeur plus faible que celle indiquée par le constructeur (usure, fuites ...). Si avant 400s le modèle du gaz parfait était satisfaisant, il ne l'est plus après. On peut expliquer cela par le fait que le libre parcours moyen a considérablement augmenté jusqu'à atteindre une taille comparable à celle du diamètre du tuyau en caoutchouc. À pression atmosphérique, le libre parcours moyen d'une molécule d'air est de l'ordre de la centaine de nm alors qu'à 1mbar il est de 0.1mm. Si le libre parcours moyen croît significativement le temps d'autocorrélation des vitesses sera plus grand. Ainsi si on associe schématiquement un sous ensemble de l'espace des phases à l'état *molécules sur le point d'être aspirées* celui-ci ne sera rempli après l'aspiration, et donc la disparition, de ces dernières, c'est à dire qu'après un temps important qui croît avec le libre parcours moyen. Ce phénomène ralentit donc l'aspiration et permet d'expliquer la remontée de la pente sur la figure I b à partir de 400s et donc la difficulté qu'il y a à descendre plus bas en pression.

II Créer un plasma et l'orienter

Pour créer un plasma il nous fallait créer un arc électrique pour ioniser l'air. Le potentiel entre les deux électrodes à partir duquel l'air est ionisé est appelé potentiel d'ionisation. Il dépend de la pression du gaz, de la distance entre les électrodes et bien sûr de la nature du gaz. Cette dépendance s'exprime par la loi de Paschen que l'on peut voir sur la figure 11.

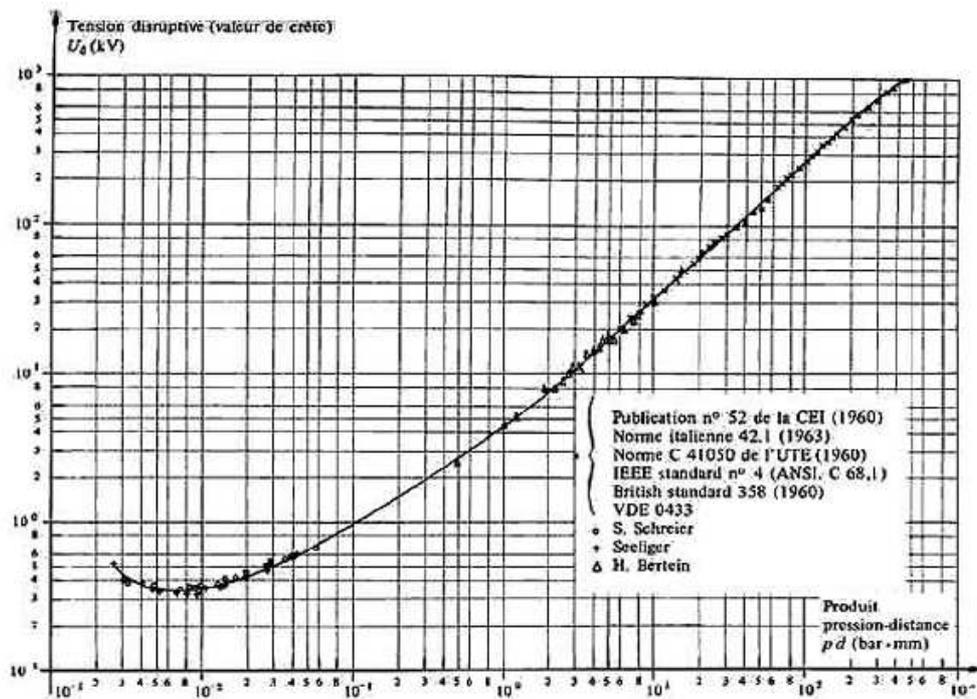


Fig. 9.11 Courbe de Paschen pour l'air en échelles logarithmiques. Température 20°C [262]

FIGURE 11 – loi de Paschen

N'ayant à disposition des générateurs ne fournissant pas plus de quelques centaines de Volts on comprend l'intérêt de descendre à basse pression. Nous voulions observer des plasmas autour des sphères. Cependant si la pression n'est pas assez basse nous observons du plasma autour de la sortie de cloche des connectiques électriques. En effet, nous avons constaté que, juste avant de sortir, ces fils avaient une petite surface en contact avec l'air. Étant très proches l'un de l'autre, (2mm) on comprend à l'aide de la loi de Paschen pourquoi nous observons plus facilement le plasma autour des connectiques quand la pression n'est pas suffisamment faible. Nous avons voulu vérifier expérimentalement la loi de Paschen avec notre système en contrôlant la distance entre les sphères. Cependant, notre étude n'a pas pu être aussi large que celle qui a donné lieu à la figure 11 à cause des limites du générateur de tension. Notre étude est présentée en figure 12, la variabilité des résultats est probablement due aux mesures de tensions qui se faisaient par lecture directe sur le générateur et non par un voltmètre. Néanmoins les tensions restent dans le bon ordre de grandeur. De même la jauge de pression n'est pas dans l'enceinte même mais connectée à un des tuyaux d'écoulement, elle ne rend donc pas tout à fait compte de la pression à proximité des électrodes.

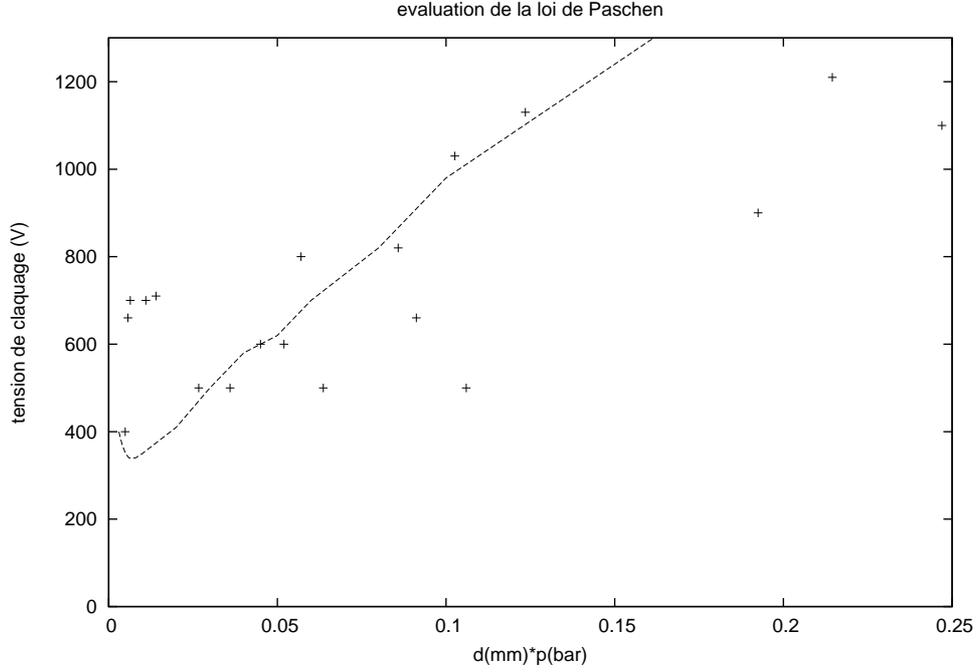


FIGURE 12 – vérification de la loi de Paschen avec en pointillé une reconstitution de la loi obtenu sur la figure 11

Pour ce qui est de l'orientation des plasmas sous l'effet des champs magnétiques créés par les aimants, nous avons eu des difficultés à l'observer sur notre premier montage. En effet on a pu constater que les effets de pointe écrasent complètement les effets du champ magnétique. Dans notre premier montage nos sphères n'étaient que du papier aluminium commercial auquel on avait donné une forme sphérique. La surface était totalement irrégulière et les effets de pointe créant des densités de charge locales importantes : elle attire fortement le plasma. La composante magnétique de la force de Lorentz devient alors complètement négligeable. Beaucoup de phénomènes stellaires qui ont une origine magnétique sont observables à l'aide de la planeterrela mais pour cela il faut que les effets magnétiques reproduits ne soient pas négligeable. Nous n'avons pas pu observer tous ces phénomènes parce que la pression, bien qu'elle permettait l'apparition d'un plasma, écrasait en partie les effets magnétiques. En effet si on s'appuie sur [1] on apprend qu'au niveau macroscopique, un gaz faiblement ionisé peut être modélisé par un fluide d'électrons, un fluide de particules neutres et un fluide d'ions. Leur mouvement obéit à l'équation (pour les électrons) :

$$n_e m_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_e \cdot \nabla \right) \vec{v}_e = n_e q_e (\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) - \nabla \cdot \overline{\overline{\Psi}}_e + \vec{P}_e \quad (1)$$

où n_e et \vec{v}_e sont la densité et la vitesse macroscopique du fluide électronique, $\overline{\overline{\Psi}}_e$ le tenseur de pression cinétique, et \vec{P}_e le terme d'interaction par collision qui dans le cas d'un gaz faiblement ionisé se réduit à un terme de frottement qui dépend de la densité n_e . Ceci montre que la cinétique macroscopique du plasma est contrôlée partiellement par la densité de particules et donc la pression. Si on avait pu descendre plus bas en pression on aurait pu s'attendre à voir d'autres effets magnétiques.

III Réaliser un spectre

Pour réaliser un spectre du plasma afin de caractériser les réactions ayant lieu, nous avons d'abord pensé à introduire une fibre optique dans l'enceinte pour être au plus près du plasma et pour que la paroi en plexiglass n'absorbe pas de raies. Cependant, il fallait pour cela pouvoir introduire la fibre dans l'ensemble à basse pression sans créer de fuites. Nous avons d'abord essayé de mettre un joint en caoutchou assez épais entre la fibre et le tuyau d'entrée. Le joint en caoutchou était du même format (que le tuyau qui relie la pompe au reste du montage. Il semblait assez étanche mais nous n'avions rien pour le plaquer contre la fibre et contre la paroi du tuyau d'entrée. Finalement nous avons pu constater en essayant le montage qu'il laissait passer trop de fuites.

L'évolution de la pression dans ce montage est représentée en figure 13. On constate effectivement que le débit est fortement limité. Les pressions atteintes (32mbar) ne nous permettent pas d'observer des plasmas. Devant le temps qu'il nous restait nous avons considéré qu'il vaudrait mieux essayer autre chose plutôt que d'attendre que la pression soit suffisamment basse ce qui nous aurait sûrement pris plusieurs heures sans garantie de succès. Nous

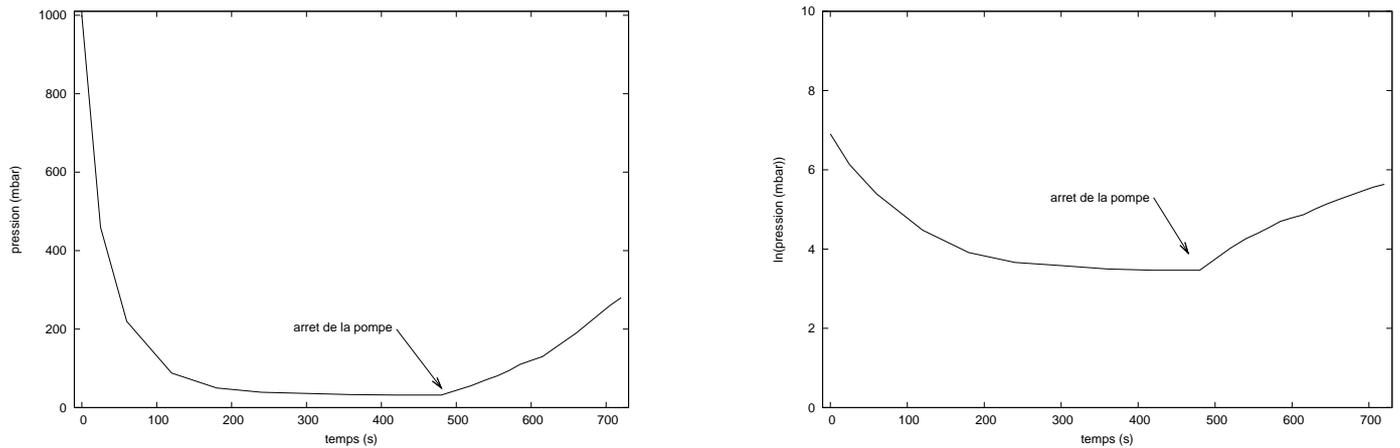


FIGURE 13 – évolution de la pression avec la fibre en échelle linéaire et logarithmique

avons donc ensuite cherché à réaliser un spectre avec la fibre optique depuis l'extérieur. Nous avons mesuré un spectre d'absorbance de la paroi en plexiglass à l'aide de la même fibre optique et d'une lampe à incandescence qui émet un spectre continu dans le visible et le proche ultra-violet. Ce spectre est présenté en figure 14. On constate que l'absorbance du plexiglass peut être négligée dans le visible. Ce qui est en cohérence avec ce que l'on sait des techniques de spectroscopie d'absorption : des cuves en plexiglass sont utilisées pour faire des spectres d'absorption visible. Cependant, un autre problème majeur est apparu : le manque de luminosité. En effet, avec ou sans la fibre optique, le spectromètre ne nous donnait pas d'autre signal que du bruit. Nous avons alors essayé un autre spectromètre et constater toujours la même absence de signal. En pointant la fibre vers diverses sources lumineuses nous avons pu remarquer que l'intensité lumineuse, à partir de laquelle le spectromètre détecte quelque chose, est bien trop importante par rapport à ce que le plasma émet. Nous sommes donc passé à des systèmes plus classiques. Après avoir testé un spectromètre Jaubin et Yvon qui ne semblait pas marcher, nous avons décidé d'utiliser un goniomètre. Pour réaliser un spectre avec un goniomètre il a fallu réaliser une courbe d'étalonnage présentée en figure 15.

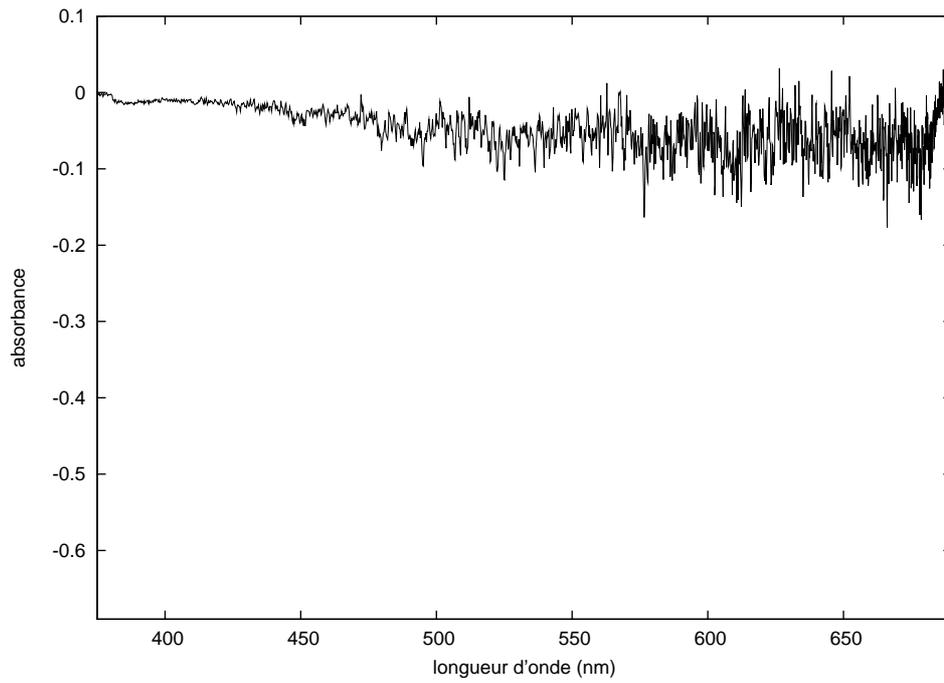


FIGURE 14 – spectre d'absorption du plexiglass

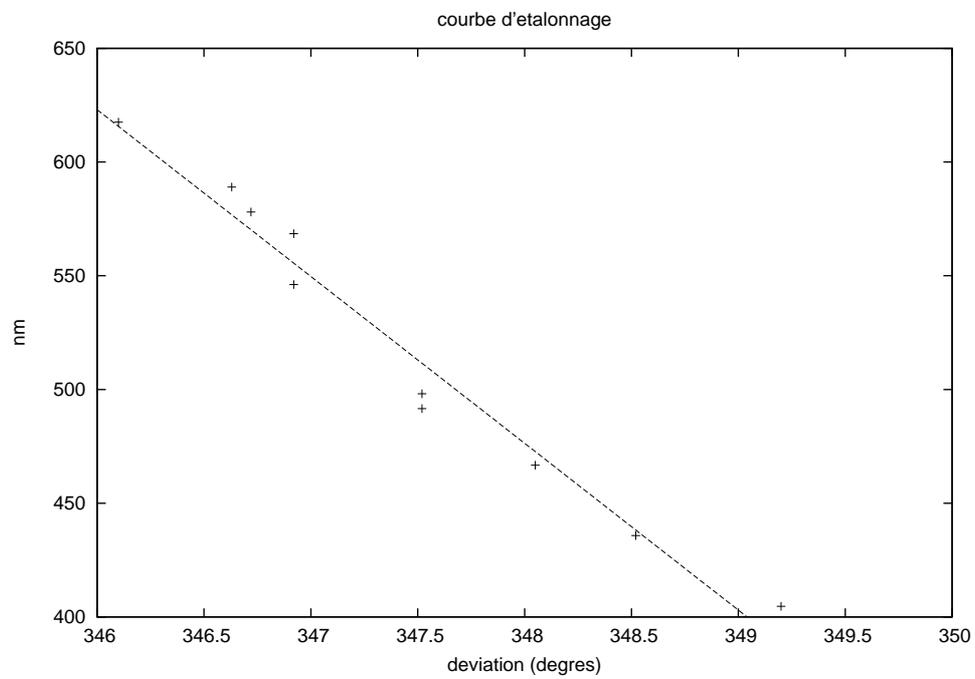


FIGURE 15 – courbe d'étalonnage

Résultats et conclusions

I Sphère de Debye

Si vous avez attentivement observé les photos de la partie , vous avez peut être remarquer quelque chose d'intrigant : il existe toujours une zone non lumineuse entre la sphère et le plasma. Il s'agit en réalité d'un phénomène bien connu en physique des plasmas, cette zone de "vide" étant déterminée par sa longueur, caractéristique du plasma, et portant le doux nom de longueur de Debye ou longueur critique d'interaction collective. La zone de "vide" correspond à une zone du plasma qui est hors équilibre particulièrement riche en électrons ; donc la densité en ions est moindre, il y a moins de collisions, et donc pas de lumière observable ! A priori, un plasma est censé être globalement neutre, sa neutralité étant assurée par un retour à l'équilibre dû à la force de Coulomb. Toutefois, l'agitation thermique perturbe localement l'équilibre des charges. Si l'énergie d'agitation est supérieure à l'énergie électrostatique, le plasma peut être dans un état stationnaire et non électriquement neutre. Au voisinage de la sphère, il y a moins de particules chargées pour rétablir l'équilibre puisque qu'à l'intérieur de la sphère, la charge est nulle. D'où cette zone riche en électrons, et donc sans lumière. La longueur de Debye est la longueur pour laquelle l'énergie électrostatique dû à toutes les particules dans une sphère de rayon de Debye est égal exactement à l'énergie d'agitation thermique. Ainsi, si le plasma en un point a autour de lui des particules de plasma dans un rayon supérieur à λ_D , ce plasma sera électriquement neutre, et émettra donc de la lumière. On peut montrer que :

$$\lambda_D \approx 6.9 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (2)$$

avec T_e la température du jet d'électrons et n_e la densité d'électrons.

Nous l'avons mesuré à l'aide d'un logiciel de traitement d'images, et obtenu une longueur de Debye égale 1,86 mm, ce qui est relativement conforme aux ordre de grandeur trouvés dans [1] à savoir $T_e = 10^4 K$ et $n_e = 10^{11} m^{-3}$.

II Interprétation des spectres

Il a été difficile d'interpréter les spectres correctement puisque malgré tout nous avons une incertitude importante sur nos déviations. En effet, les raies étaient relativement large et peu lumineuse ce qui rendait la mesure de l'angle de déviation difficile. On estime que notre erreur est de l'ordre de 20 minutes d'angle ce qui correspond à une erreur proche de 20nm. Nous avons pu faire deux mesures correctes de ces raies. Lors de la première nous avons pu repérer trois raies alors qu'à la seconde nous n'en distinguons que 2. Nous avons pu identifier 4 raies dont une deux fois de suite (celle à 424nm).

longueur d'onde en nm	nombre d'onde en cm^{-1}
424 ± 20	23550 ± 1110
479 ± 20	20852 ± 870
542 ± 20	18454 ± 681
612 ± 20	16330 ± 534

Nous avons cherché dans la littérature (notamment [2] et [3]) pour associer ces raies à des molécules que l'on peut raisonnablement trouver dans le plasma. Même en se limitant aux éléments N et O on peut potentiellement associer les raies obtenues à une dizaine de raies théoriques. Une raie mesurée pouvant correspondre à un ensemble de

raies proches au vu de l'étalement des raies observées au goniomètre. Voici les raies plus intenses que l'on peut peut-être associer, ainsi que l'atome ou la molécule à laquelle elle correspond.

longueur d'onde de la littérature (en nm)	raie mesurée	entité correspondante
404, 424 et 444	424 ± 20	N^+
460, 463 et 500	479 ± 20	N^+
549 et 566	542 ± 20	N^+
464	479 ± 20	O^+
615 et 616	612 ± 20	O
600	612 ± 20	O_2^+
420	424 ± 20	N_2^+

Tout porte à croire que nous avons pu identifier des raies appartenant très probablement à de l'air faiblement ionisé. Il est plus difficile de dire parmi ces raies lesquelles nous avons réellement observées.

III Ce que l'on aurait pu faire

Si nous avions eu plus de temps nous aurions aimé travailler sur d'autres points. Une des possibilités intéressantes, et qui aurait permis de nous faire gagner en luminosité aurait été de changer le gaz à l'intérieur de la cloche à vide. En effet, par exemple, l'ajout d'argon au gaz permet de stabiliser les transitions électroniques, et ainsi augmenter le nombre d'électrons dans les orbitales excitées, ce qui augmente donc le nombre de désexcitations, et donc la luminosité. De la même façon, travailler en atmosphère pure de diazote aurait sûrement augmenté la luminosité. Cela aurait éventuellement permis, d'observer le spectre du plasma avec un spectromètre, ce qui nous aurait accordé plus de précision et de pouvoir observer si le spectre reste le même quelque soit la pression, ce qu'il aurait été intéressant d'étudier aussi. Enfin, un autre phénomène intéressant est que lorsque le plasma est formé et que l'on éteint lentement le générateur, on peut voir que le plasma se dissipe toujours vers l'extérieur, et avec une vitesse croissante! Nous aurions aimé étudier ce phénomène plus en détail, voir quelle force poussait le plasma vers l'extérieur : Cela correspond t-il à une force de collision? La force électrostatique due aux électrons dans la sphère de Debye? Ou bien simplement à la force centrifuge, qui correspondrait alors au fait que le plasma tourne autour de la sphère.

Bibliographie

- [1] Jean-Loup Delcroix et Abraham Bers. Physique des Plasmas.
- [2] 89 th. Handbook of chemistry and physics. Handbook, 2008.
- [3] Herzberg. Spectra of diatomic molecules.
- [4] Jean Lilensten. site de la planeterrella. [http ://planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/](http://planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/).

[1]

[2]

[3]

[4]