

Rapport de stage :

LA PLANETERRELLA



Maîtres de stage : J. Liliensten

Introduction :

Les aurores polaires sont observées depuis des millénaires sur la terre. Dans les régions australes et surtout boréales, l'Homme a toujours été intrigué par ces lueurs venues du ciel auxquelles il devait donner une signification. Ces phénomènes mystérieux sont à l'origine de multiples mythes et légendes, d'interprétations innombrables, variables selon les cultures et les époques.

Avec le développement de l'esprit scientifique et de l'interprétation rationnelle du monde, ce phénomène étrange a intéressé les physiciens. Au XIX^e siècle, le norvégien Kristian Birkeland a été le premier à faire le lien entre les aurores et les phénomènes magnétiques produits par les interactions entre les étoiles et les planètes. En 1885 il conçoit une expérience qui consistait à tirer des électrons sur une sphère magnétisée dans une enceinte à vide. Près d'un siècle plus tard, les phénomènes circulaires produits par K.Birkeland en laboratoire à partir d'une théorie sont réellement observés sur la Terre.

Avec la capacité de reproduire en laboratoire ces phénomènes naturels, il devient possible d'explorer et de comprendre de manière de plus en plus précise comment se combinent entre eux les multiples éléments qui sont à l'origine de l'apparition d'aurores polaires sur la Terre et sur les planètes magnétisées..

Reprenant l'expérience de K.Birkeland, Jean Liliensten, docteur en géophysique, chercheur CNRS au Laboratoire de Planétologie de Grenoble, a mis au point un dispositif expérimental capable de simuler en laboratoire ces phénomènes magnétiques.

La Planeterrella est un outil pédagogique très apprécié du grand public que J.Liliensten a pour projet de faire breveter. Cette expérience permet d'illustrer et de faire comprendre, notamment à des collégiens et des lycéens, des phénomènes physiques complexes, dont les effets sur notre vie quotidienne apparaissent de plus en plus importants et pour lesquelles J.Liliensten est acteur du développement récent de la météorologie de l'espace. Ce type d'expérimentation, très visuelle, permet à la science de sortir des laboratoires. Les chercheurs peuvent ainsi toucher un large public pour l'informer des grandes énigmes sur lesquelles ils travaillent et les outils qu'ils utilisent pour les résoudre. Ils partagent ainsi leurs connaissances.

Afin de reproduire et de simuler un grand nombre de systèmes physiques présents dans l'Univers, la mise en œuvre de cette expérience passe d'abord par un minutieux travail d'étalonnage du matériel. Une partie théorique complète ensuite ce travail pour permettre de mieux comprendre les phénomènes observés.

Le dynamisme et la bonne ambiance au sein du laboratoire m'a permis de réaliser un travail constructif qui, je l'espère contribuera à l'avenir prometteur du développement de la « Planeterrella ».

Je n'oublierai pas de remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail de recherche.

DIRECTIVE

Introduction.

1. Présentation du laboratoire.

1.1 Le statu du Laboratoire de Planétologie de Grenoble (LPG).

1.2 Structure en équipe et effectifs.

1.3 Les activités.

- 1.3.1 *Equipe surface, subsurface planétaire et des noyaux cométaires.*
- 1.3.2 *Equipe aéronomie de la terre et des planètes.*
- 1.3.3 *Equipe spectroscopie matière moléculaire solide du système solaire.*

1.4 Une communauté scientifique.

2. L'expérience : La Planeterrella.

2.1 Historique.

2.2 Matériels et dimensions.

- 2.2.1 *Les aimants.*
- 2.2.2 *Les sphères métalliques.*
- 2.2.3 *Les buses électriques.*
- 2.2.4 *La cloche.*
- 2.2.5 *Table de base.*
- 2.2.6 *Pompe à vide et raccords.*
- 2.2.7 *Générateur de tension.*

2.3 Etalonnage.

- 2.3.1 *Les différentes configurations.*
- 2.3.2 *Système de coordonnées cylindriques.*
 - 2.3.2.1 *Coordonnées polaires.*
 - 2.3.2.2 *La coordonnée Z.*
- 2.3.3 *Les axes d'inclinaisons.*
- 2.3.4 *L'approximation dipolaire des aimants.*
- 2.3.5 *Les observations.*
 - 2.3.5.1 *Un anneau de courant.*
 - 2.3.5.2 *Simulation d'une magnétosphère.*
- 2.3.6 *Les « feuilles de routes ».*

3. Etude théorique.

3.1 Physique des Plasmas

- 3.1.2 *Qu'est-ce qu'un « Plasma » ?*
- 3.1.3 *Décharge dans un plasma.*
- 3.1.4 *Etude collisionnelle.*
- 3.1.5 *Elément de spectroscopie et couleurs.*

3.2 Trajectoires des particules.

- 3.2.1 *Particule dans un champ magnétique dipolaire.*
- 3.2.2 *Région permise et interdite.*

Conclusion.

Bibliographie.

Annexes.

1. Présentation du laboratoire.

Adresse du laboratoire : Bâtiment D 3^{ème} étage
122 rue de la piscine
Domaine universitaire
38400 St Martin d'Hères

Secrétariat : secretaria-lpg@obs.ujf-grenoble.fr
Téléphone : 04 76 51 41 51
Fax : 04 76 51 41 46

1.1 Le statu du Laboratoire de Planétologie de Grenoble (LPG).

Le Laboratoire de Planétologie de Grenoble est une unité de recherche du CNRS et de l'UJF (Université Joseph Fourier). Le laboratoire est une composante de recherche de l'Unité de Formation et de Recherche en Physique de l'UJF et de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG) regroupant au total six laboratoires et deux équipes de recherche :

De l'UJF :

- Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble (LAOG)
- Laboratoire de Planétologie de Grenoble (LPG)
- Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines (LGCA)
- Laboratoire de Géophysique interne et Tectonophysique (LGIT)
- Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGCE)

De l'INPG :

- Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)
- Equipe « Signaux et Images dans les milieux Naturels »
- Equipe « Modélisation des Ecoulements Océaniques à Moyenne et grande échelle »

Cette unité, fondée en 1999, regroupe une quinzaine de personnels permanents (chercheurs, ingénieurs, personnels administratifs), ainsi que des personnels contractuels (ingénieurs, techniciens), des doctorants, des étudiants. L'effectif moyen est de 25 personnes.

1.2 Structure en équipe et effectifs.

Le laboratoire est sous la direction de Mme. Odile Dutuit chercheur en physico-chimie sur les atmosphères planétaires. Le groupe se divise en trois équipes de recherche :

- Equipe surface, subsurface planétaire et des noyaux cométaires
- Equipe aéronomie de la terre et des planètes
- Equipe spectroscopie matière moléculaire solide du système solaire

Ces trois équipes sont soutenues par le service de préparation des missions spatiales qui est chargé de développer les outils nécessaires aux axes de recherche du laboratoire en coopération avec différents laboratoires en France et dans le monde.

Les personnes travaillant dans le laboratoire sont :

- Des chercheurs, dont :
 - Les enseignants chercheurs ayant un poste dans un établissement d'enseignement supérieur, les maîtres de conférences ou professeurs des universités titulaires (3).
 - Les chercheurs à plein temps qui en général peuvent aussi enseigner mais n'en ont pas l'obligation. Ils peuvent être financés sur la base de projets de recherche avec une durée déterminée, ou bien disposer d'un emploi stable comme les chercheurs titulaires (7).
 - Les chercheurs doctorants, généralement en contrat à durée déterminée avec un établissement de recherche ou d'enseignement supérieur, une entreprise, ou encore une structure institutionnelle. Selon leur situation, ils peuvent ou doivent également enseigner (10).
- Des ingénieurs et techniciens, chargés de travaux sur les installations expérimentales et des moyens informatiques (4).
- Des stagiaires (x).
- Des personnels administratifs qui gèrent entre autre le budget du laboratoire (2).

1.3 Les activités.

La description ci-dessous est une liste non exhaustive des activités menées au sein du laboratoire et présente les principaux axes de recherche de chacune des équipes.

1.3.1 Equipe surface, subsurface planétaire et des noyaux cométaires :

Les axes de recherche se concentrent sur l'étude des surfaces et subsurfaces planétaires ainsi que de la structure interne des « petits corps ». L'utilisation de méthodes radar pour étudier ces objets constitue la spécificité de ce groupe. Cette approche consiste à modéliser des signaux radar réfléchis par la surface et la subsurface ainsi qu'à interpréter ces signaux pour évaluer les paramètres morphologiques et les propriétés de surface et du sol.

Ces compétences sont mises en pratique dans différentes missions :

- Rosetta : compréhension de la structure interne des comètes.
- Huygens et Cassini : à partir de mesures obtenues par l'altimètre de Huygens à une échelle centimétrique et celle générées par le radar de la sonde CASSINI. Des modèles sur la structure de Titan sont en cours de développement (surface plates, composée de neige...).
- Mars Express : grâce aux radars orbitaux les premières visions du sous sol de Mars sont possibles ainsi que leurs études.

1.3.2 Equipe aéronomie de la terre et des planètes :

L'aéronomie est l'étude des hautes atmosphères. L'aéronomie spatiale s'intéresse tout particulièrement aux zones atmosphériques, à l'intérieur desquelles une partie du gaz neutre est ionisé par le rayonnement solaire dans l'extrême ultra violet.

L'équipe travaille sur les manifestations entre le soleil et les atmosphères planétaires et en particulier sur l'atmosphère Terrestre. Une large partie de leurs travaux s'appuie sur les données des radars EISCAT.

1.3.2 Equipe spectroscopie matière moléculaire solide du système solaire :

Le thème général de recherche de cette équipe consiste en l'étude des phases moléculaires solides (glace, composés soufrés, hydratation minérale, ...) recouvrant la surface des planètes, des satellites et des « petits corps » du système solaire. Les deux principaux objectifs de recherche sont :

- Détermination des différentes caractéristiques des phases moléculaires solides et de la matière sombre, pour une large variété d'objets du système solaire.
- Analyse et interprétation d'observation spectroscopiques contribuant à la compréhension l'origine et de l'évolution des systèmes planétaires.

1.4 Une communauté scientifique.

Cette structure en équipe de recherche rassemble les intérêts de chacun au sein de la communauté scientifique.

En effet, chaque groupe de travail se rencontre régulièrement, au minimum d'une fois par mois, en salle de réunion sous la direction de Mme. Odile Dutuit. Tout le personnel établit alors un bilan détaillé de ses activités de recherche faisant part de ses résultats, de ses problèmes non résolus et de ses intentions avenir. Le sujet des relations internationales est aussi largement évoqué. Ceci me permet de découvrir avec intérêt ces relations et la place du laboratoire au sein, principalement de la communauté scientifique européenne mais aussi dans le monde.

De plus, différents membres des équipes présentent régulièrement leurs activités au membre du laboratoire.

Des interventions extérieures sont également proposées au personnel. Cet intérêt général du laboratoire m'a permis d'assister à des conférences comme par exemple celle donnée par M. Michel Mayor, Directeur de l'Observatoire de Genève, sur « La Recherche d'Exoplanètes Rocheuses ».

Enfin, j'ai apprécié la disponibilité de l'ensemble du personnel. Ce groupe de recherche permet ainsi de partager communément des capacités de chacun.

2. L'expérience : La Planeterra.

Cette expérience permet de mettre en évidence, en laboratoire, les interactions entre une étoile et ses planètes magnétisées l'entourant. Le phénomène d'aurores polaires est notamment l'objet d'étude de cette expérience. Les aurores polaires étant observées sur La Terre, notre planète reste le premier élément d'observations et de mesures qui compléteront le travail d'étalonnage de « La Planeterra ».

2.1 Historique.

Le premier ouvrage Français consacré à l'étude du phénomène d'aurore polaire, a été écrit par M. Jean-Jacques De Mairan et imprimé en 1733. Cette ancienne source historique: « Traité physique et historique de l'Aurore Boréale » nous donne des renseignements sur la pensée scientifique de cette époque. Effectivement, au XVIII^e siècle on suppose déjà que le Soleil était responsable du phénomène, au caractère attrayant et mystérieux, dans les régions du pôle nord de La Terre. Je cite M. De Mairan :

« Puisque les preuves de droit nous manquent, et que nos connaissances sont si loin d'atteindre à la cause primitive des changements qui arrivent à l'Atmosphère Solaire, pour en déduire les temps d'apparition des Aurores Boréales, tout au moins devons nous montrer, conformément à nos principes, l'accord qui se trouve entre ces deux phénomènes. ... Il est apparu, depuis que nous avons commencé d'y faire attention... que l'Atmosphère Solaire, a paru plusieurs fois d'une étendue suffisante pour arriver jusqu'au Globe Terrestre. » (1995)

Loin de laisser cette interprétation dans l'oubli, le physicien norvégien Kristian Birkeland (1876-1917), convaincu d'une corrélation entre le Soleil et la Terre mis au point une expérience en 1885 appelée « La Terrella ». Les observations et les résultats alors obtenus ont pu être confirmés au milieu du XX^e siècle notamment après les premières photographies satellite de l'ovale auroral. La configuration de son expérience lui a permis de voir (sans les identifier) également des anneaux de courant lui évoquant la forme des anneaux de Saturne.

J.Lilensten a alors repensé la manip de K.Birkeland en donnant à l'ensemble expérimental une plus grande souplesse de configuration. Un très grand nombre de situations planétaires du système solaire mais également de système constitué d'exoplanète magnétisée peut être mis à l'étude par cette expérience. C'est pourquoi J.Lilensten l'appelle désormais « La Planeterra ». (Site Internet 1)

2.2 Matériels et dimensions.

Une description détaillée des coûts pour la construction d'une Planeterra sera réalisée avant la fin du stage.

2.2.1 Les aimants.

Les aimants mis à disposition sont au nombre de six et tous identiques. Selon le constructeur, ces aimants terre rare sont composés de néodyme de fer et de bore avec une intensité de 11000 Gauss soit 1,1 Tesla. Leur forme est cylindrique : - Diamètre = 2 cm
- Hauteur = 1 cm



2.2.2 Les sphères métalliques.

Les deux sphères sont creuses et composées essentiellement d'aluminium. Le fort pouvoir conducteur de ce matériau devant celui de l'air ambiant donne à ces sphères le rôle de cathode ou d'anode (selon les polarités) de notre expérience. Elles peuvent s'ouvrir dans le plan équatorial afin d'y insérer un ou plusieurs aimants. Ces sphères sont imbriquées sur un socle plastifié creux conçu de manière à faire varier la hauteur de celles-ci. Enfin, Elles sont connectées à un fil conducteur passant à l'intérieur du socle.

- Grande sphère : Diamètre intérieur = 8,8 cm
Epaisseur = 1 cm
- Petite sphère : Diamètre intérieur = 4 cm
Epaisseur = 1 cm



2.2.3 Les buses électriques.

La buse joue également le rôle d'anode ou de cathode, elle est reliée à un fil conducteur. De forme cylindrique l'une des deux présente la particularité de terminer en pointe.

- Diamètre = 2-3 mm
- Longueur = 4 cm



La buse est attachée à un bras coudé. Elle peut ainsi prendre diverse position et angle d'attaque à l'intérieur de l'enceinte.

2.2.4 La cloche

La cloche est l'enceinte dans laquelle nous faisons le vide. Elle est en matériaux plexi qui permet d'absorber le rayonnement UV créé en abondance, comme nous allons le voir ensuite, dans nos conditions expérimentales.

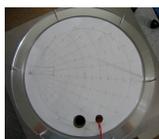
- Diamètre extérieur = 40 cm
- Diamètre intérieur = 39 cm
- Hauteur = 52 cm



2.2.5 Table de base.

La table est à la base du montage. Elle est taillée de manière à ce que le bas de la cloche s'encastre parfaitement. Un joint est nécessaire entre le fond de la cloche et la table pour assurer l'étanchéité.

- Dimension de la table de base : 50 cm de coté
- Cylindre permettant de poser la cloche : Diamètre = 49 cm
Epaisseur = 3 mm
- Fente cylindrique pour insérer le joint : Diamètre = 46,7 cm
Epaisseur = 3 mm
Largeur = 9 mm



La table est également percée de deux trous. L'un pour assurer l'évacuation de l'air (diamètre = 4,1 cm) et l'autre permettant de raccorder les fils conducteurs à l'extérieur de l'enceinte (diamètre = 2,7 cm) à l'aide d'un système ingénieux étanche.

2.2.6 Pompe à vide et raccords.

La pompe à vide est dite primaire. Elle fonctionne à l'aide d'un moteur électrique et contient une charge d'huile permettant l'étanchéité de la pompe. La sortie d'air est reliée à un séparateur de brouillard (en orange) évitant ainsi les vapeurs d'huile toxique. L'entrée est attachée à un système de raccordement relié à un tuyau flexible jusqu'au trou prévu sous la table. Une valve (en vert) permet de contrôler l'aspiration dans une moindre mesure. Une entrée d'air est aussi prévue sur le système de raccordement.

Remarque : la valeur minimal de pression atteinte par la pompe est de : 1,1^E-2 mbar.

Un capteur de pression est également relié au système de raccordement puis à l'afficheur par un port USB.



2.2.7 Générateur de tension.

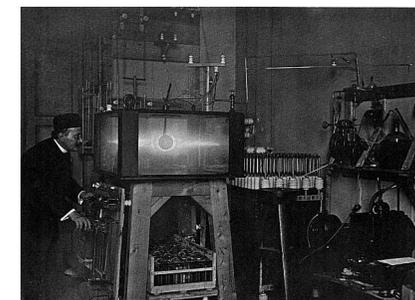
Les fils conducteurs reliés aux deux sphères et à la buse peuvent être alors connectés au générateur de courant continu délivrant une tension allant de 100 à 3000 volts. Son intensité maximum est de 25 mA.



Ainsi est constitué « La Planetterella » de J.Lilensten comparé ici à la « Terrella » de K.Birkeland. L'expérience est maintenant l'objet d'étude afin d'élaborer un étalonnage précis des constituants et des phénomènes observés. Elle sera également par la suite, l'outil nécessaire pour répondre aux attentes de l'étude théorique.



La Planetterella par J.Lilensten.



La Terrella par K.Birkeland. (Site Interne 2)

2.3 Etalonnage.

L'étalonnage d'une telle expérience présente de nombreuses difficultés techniques et pratiques. Je citerai entre autre : La rigueur du travail afin de garder la matériel propre et exploitable, les difficultés à mesurer les axes d'inclinaisons ou encore les temps d'attentes entre chaque expérimentation. Le temps de pressurisation et de dépressurisation est relativement long, il laisse environ 30 minutes avant de pouvoir de nouveau observer.

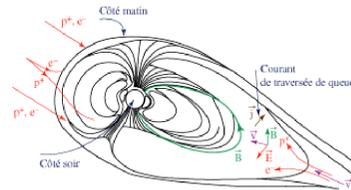
De plus, avant de préparer mon travail d'étalonnage, j'ai pu apprécier la diversité des phénomènes observés. Au nombre de 8 configurations électriques possible pour une seul disposition (buse+2sphères) et d'une infinité de dispositions des constituants dans l'enceinte, j'ai du reconnaître avant tout les similitudes et les désaccords entre chacune des observations.

Enfin, l'étalonnage amènera à la mise au point d'une feuille de route permettant une prise des mesures et des observations pratiques et rapides.

2.3.1 Les différentes configurations électriques et simulations.

Bref rappel : Les interactions entre le Soleil et une planète magnétisée (La Terre) résulte d'un contact entre les particulaires du vent solaire (électron et proton) et la magnétosphère de la Planète. (2001)

Dans le cadre de l'expérience, on assimile le Soleil à la cathode (envoyant les électrons) et la Planète (recevant les électrons) magnétisé à l'anode.



Huit configurations électriques sont présentées ci-dessous et simulent les différentes interactions :

Par raison de commodité, le premier terme avant le point virgule constituera la cathode et le second l'anode.

- 1/ Buse ; Grande Sphère : Interactions entre le vent solaire et une planète.
- 2/ Buse ; Petite Sphère : Interactions entre le vent solaire et une planète.
- 3/ Grande Sphère ; Buse : Simulation d'une étoile.
- 4/ Petite Sphère ; Buse : Simulation d'une étoile.
- 5/ Petite Sphère ; Grande Sphère : Interactions entre une étoile et une planète.
- 6/ Grande Sphère ; Petite Sphère : Interactions entre une étoile et une planète.
- 7/ Buse ; Grande Sphère + Petite Sphère : Interactions entre le vent solaire et deux planètes ou une planète et son satellite.
- 8/ Buse + Sphère ; Sphère : Simulation d'un vent solaire + une étoile en interaction avec une planète.

2.3.2 Système de coordonnées cylindriques.

Afin de repérer le positionnement des deux sphères et de la buse dans l'enceinte j'ai élaboré le système de coordonnées cylindrique suivant :

2.3.2.1 Coordonnées polaires.

A la base de mon repère, j'ai calqué sur la table de l'expérience une feuille de papier dessin de dimension identique au diamètre intérieur de la cloche. Soit 39 cm.

L'origine du repère se situe sur un coin du bras de manière à ce que la buse soit considérée comme l'origine après sa projection virtuelle sur le plan de la table.

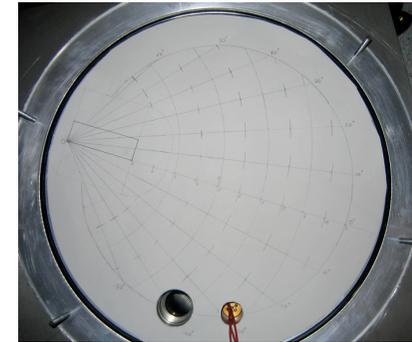
Ensuite le repère se répartie tout d'abord en 11 positions radiales espacées de 2,55 cm, la première position étant à 8 cm de l'origine.

La distance « R » à l'origine de la position « n » est donné en cm par :

$$R(n) = 8 + (n - 1) \times 2,55$$

Puis en 12 positions angulaires nous donnant des latitudes positives jusqu'à 60° et des latitudes négatives jusqu'à -50°. Les angles sont tracés tous les 10°.

La zone externe non tracée indique une limites des dispositions des sphères du à leurs dimensions. Le rectangle ayant un bord sur l'origine représentant la position du bras coude sur la table est également indiqué.



2.3.2.2 La coordonnée Z.

Les deux sphères, comme indiqué plus haut, peuvent prendre différente hauteur dans l'enceinte. J'ai alors tracé au feutre indélébile 10 positions allant de 0 à 9 pour la grande sphère et 8 positions pour la petite allant de -2 à 5 espacé chacune de 1 cm.

Par convention, la hauteur est mesurée de la feuille (Z=0) au plan équatorial de la sphère. De plus la hauteur minimale de la grande sphère qui est égale à 21 cm constitue la position « 0 ». Elle indique la position « 0 » de la petite sphère qui a une hauteur minimale égale à 19 cm. Elle peut ainsi prendre deux positions négative : -1 et -2.

La hauteur « H » des positions « n » est donné en cm par :

- Grande sphère : $H(n) = 21 + n$
- Petite sphère : $H(n) = 19 + n$

Rem : La prise de note de la position se fait au bas de la marque

La hauteur de la buse peut également varié sur le bras coudé. La position « 0 » la plus basse se situe à 14,5 cm. Les différentes marques « n » prévues à cet effet sont au nombre de 4 et sont espacées de 5 cm.

Conversion en cm : $H(n) = 14,5 + 5n$

2.3.3 Les axes d'inclinaisons.

Cette partie présente plusieurs difficultés techniques et concerne essentiellement l'orientation de l'axe magnétique du système aimanté à l'intérieur des sphères.

Avant d'élaborer un système convainquant il m'a fallu procéder de nombreuse observation, dans diverse configuration du système aimanté, afin d'établir une bonne corrélation entre mes connaissances théoriques sur les approximations dipolaires des planètes magnétisées et les phénomènes observés. Nous pouvons en effet combiner plusieurs aimants entre eux pour générer le champ magnétique.

Le système aimanté étant à l'intérieur de la sphère il est nécessaire de faire une marque à l'extérieur pour visualiser l'axe magnétique. Devant la difficulté technique à obtenir une bonne précision, on peut utiliser un trombone qui de l'extérieur s'accroche à la sphère et indique ainsi l'axe magnétique. L'idéal serai d'utiliser un aimant de même dimension mais d'intensité bien moins forte (devant les 1 Tesla) afin d'éviter de rayer la structure poli de la surface de la sphère. Certain aimant de haut parleur présente par exemple ces caractéristiques. Ainsi nous pouvons estimer l'angle d'inclinaison par rapport à l'axe vertical Z

L'inclinaison suivant le plan horizontal est mesurée entre le rayon dessiné partant de l'origine vers la position de la sphère et la projection de l'axe magnétique sur ce même plan.

Par convention 0° correspond à un alignement (suivant cet ordre) entre l'origine le pôle sud et le pôle nord de la sphère. Le cercle trigonométrique indique alors les différents angles d'inclinaisons.

Comme nous allons le voir à présent, les dimensions relatives des sphères et des aimants ne permettent de simuler, qu'une seule planète magnétisée. A savoir, la petite sphère avec un seul aimant central. Cette constatation maintenant faite je pourrai confectionner une boule pleine avec un aimant au centre, en mousse par exemple, qui sera placé (en dimension égales) à l'intérieur de la petite sphère. Ceci évitera les difficultés techniques à faire tenir les aimants.



2.3.4 L'approximation dipolaire des aimants.

Les lignes de champ magnétique que l'on peut visualiser à l'aide de grains de limaille de fer permettent d'établir différent système aimanté paraissant respecter au mieux l'approximation dipolaire.

Avec M.Barthélemy nous avons alors procédé à leur étalonnage. Nous avons utilisé pour cela une sonde à effet hall. La mesure du champ magnétique en différent point permet de calculer le moment dipolaire pour les deux configurations suivantes :

- Trois aimants alignés séparé de 2,9 cm.
- Un seul aimant.

Le moment dipolaire est donné par la formule suivante : (1999)

$$M = 10^7 \times r^3 \times \frac{B}{\sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}}$$

M : Moment dipolaire

r : Distance au centre du système

θ : Angle par rapport à l'axe magnétique

Les résultats sont donnés respectivement en *annexe 1*.

L'écart est très net entre les deux résultats. L'appropriation dipolaire est alors acceptable dans pour un seul aimant. En effet le moment dipolaire reste, dans une moindre mesure, constant entre 2 et 7 cm les barres d'incertitudes s'élargissent ensuite avec la distance.

La légère similitudes observé, à plus grande échelle, pour le premier système permet de dire que l'approximation dipolaire est nettement moins respectée.

Cette situation est idéale pour la petite sphère. De rayon égal à 2 cm celle-ci peut relativement bien simuler le caractère magnétique d'une planète aimanté.

Remarque : La sonde à effet Hall est censée être étalonné. Cependant elle indique au maximum une valeur du champ magnétique égale à 400 milli Tesla, celle donné par le constructeur étant de 1 Tesla.

2.3.5 Les observations.

Ces constatations sur les aimants n'enlèvent rien à la beauté et aux divers phénomènes magnétiques de l'expérience. Dans le cadre de ce rapport, il sera développé essentiellement les effets agissant sur la petite sphère qui présente le caractère dipolaire.

2.3.5.1 Un anneau de courant.

La sphère simulant une étoile (anode) montre le caractère suivant :

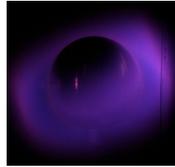
Un anneau de courant se dessine dans un plan. Les nombreuses observations permettent d'affirmer que cette anneau se situ dans le plan équatorial de l'aimant placé au centre de la sphère.

Il est observable dans toutes les positions dans l'enceinte et dans une large gamme de valeur de pression. ($4 \times 10^{-1} mb \rightarrow 3 \times 10^{-2} mb$).

Remarque : L'angle d'inclinaison de l'anneau de courant donne une nouvelle précision sur la position de l'axe magnétique de la sphère.



Avec la grande sphère, dans une même configuration d'aimantation, le phénomène est plus difficilement observable. L'anneau paraît plus élargie et disparaît très rapidement avec la pression. De rayon égal à 4,4 cm, la variation du moment dipolaire avec la distance pourrait traduire cet élargissement et ces discontinuités.



Remarque : K. Birkeland avait également observé cet anneau de courant. Il pensait avoir simulé les anneaux de Saturne.

2.3.5.2 Simulation d'une magnétosphère.

Un point essentiel de cette expérience est de pouvoir simuler l'interaction entre une étoile (cathode) et la magnétosphère d'une planète (anode). En effet, la sphère présente la remarquable caractéristique physique suivante : celle de reproduire en laboratoire les ovales auroraux et l'anneau de courant situé à l'intérieur de la magnétosphère appelé « Ceinture de Van Allen ».

Les ovales nord et sud sont bien dessinés sur la sphère (en rose) et l'anneau de courant apparaît (en bleu) avec une intensité lumineuse croissante quand la pression diminue. (A partir de $8 \times 10^{-2} mb$).



Remarque 1 : cette apparition progressive en fonction de la pression laisse penser que la ceinture puisse exister lorsqu'elle n'est pas visible. Les limites de cette remarque ne sont pas mesurables expérimentalement avec nos moyens techniques.

Remarque 2 : Cet anneau simulé en même temps que les ovales auroraux n'apparaît sur aucune des photographies que j'ai pu trouver dans les publications de K. Birkeland.

2.3.6 Les « feuilles de routes ».

De nombreux phénomènes se manifestent par la diversité des configurations de l'expérience. C'est pourquoi les « feuilles de routes » les répertoires afin d'établir des correspondances physiques entre elles.

Elles rassemblent les différents points évoqués dans l'étalonnage de la Planetterella. Celles-ci indiquent tout d'abord le positionnement du matériel dans l'enceinte. Ensuite un tableau permet de corréler les observations aux configurations électriques, aux valeurs de tension et de pressions.

Enfin j'insisterais sur l'importance des grandeurs relatives indispensables pour l'étude physique des interactions. Ces mesures peuvent être déduites des premières notes mais il est préférable d'en prendre les valeurs dès le début.

Une feuilles de routes est présenté en [annexe 2](#). La totalité de celles-ci seront laissées à J.Lilensten en format informatique à la fin de mon stage le 30 juin 07.

3. Etude théorique.

L'étude théorique se compose de deux parties directement reliées. La première décrit le comportement des électrons lors d'une décharge dans un plasma. Cette première approche à la physique des plasmas montrera quelques aspects des réactions produites dans l'enceinte. La seconde partie consiste à reprendre les équations de trajectoires des électrons dans un champ magnétique établi par Carl Stormer. Il sera alors établi des correspondances avec la Planetterella.

3.1 Physique des plasmas.

Dans le cadre de l'expérience, la composition du gaz à l'intérieur de l'enceinte à vide est la même que celle de l'air ambiant. Composé de 80% d'azote et de 20% d'oxygène à l'état moléculaire, ce gaz constitue un plasma.

3.1.1 Qu'est-ce qu'un « Plasma » ?

Dans les conditions usuelles, un milieu gazeux ne permet pas la conduction de l'électricité. Soumis à un champ électrique faible, un gaz pur ne contenant aucune particule chargée libre est considéré comme un isolant parfait.

Cependant des électrons libres et des ions positifs peuvent apparaître si l'on soumet le gaz à un fort champ électrique. Lorsque l'ionisation résultante est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit comparable à celui des molécules neutres, le gaz devient alors un fluide très conducteur appelé plasma.

3.1.2 Décharge dans un plasma.

On peut distinguer différentes zones de la décharge par leur intensité lumineuse, donnant lieu à une stratification en couches sombres et brillantes. De la cathode vers l'anode, on observe successivement :

- *l'espace sombre cathodique* (dit de Crookes).
- *la lueur négative* : c'est une zone d'ionisation intense où sont produites les espèces de l'émission secondaire.
- *l'espace sombre de Faraday*.
- *la colonne positive*, repérée par sa forte luminosité : c'est la zone de loin la plus étendue. Elle est constituée d'un plasma neutre d'électrons et d'ions positifs, dans lequel le champ électrique reste constant.
- enfin, *l'espace sombre anodique*.

La taille et la luminosité de ces régions dépendent de la nature du gaz, de la pression et de la tension appliquée. En règle générale, la lueur négative est plus lumineuse que la colonne positive, et est colorée différemment.

Ces différentes couches sont visibles sur la sphère « cathodique ». [L'annexe 3](#), présente les distributions de luminosité, du champ électrique et des charges lors d'une décharge entre deux électrodes planes parallèles (1962). On remarque en particulier que le champ électrique s'annule très rapidement et qu'il reste très faible le long du trajet parcouru par les électrons. Le volume étendu de l'enceinte de la Planetterella explique le fait de ne pas observer (en général) la lueur de la colonne positive entre les électrodes. Elle reste seulement visible au voisinage de la cathode et de l'anode.



3.1.3 Etude collisionnelle.

Le gaz contenant quatre fois plus d'azote que d'oxygène, l'étude collisionnelle concerne les réactions produites sur l'état moléculaire le plus abondant (N₂). De plus le gaz est considéré comme parfait devant les basses pressions (≈ 10 Pascal).

La détermination des fréquences de collision est un point important pour comprendre la dynamique des interactions dans le milieu gazeux.

Proportionnelle au nombre de particule cible par unité de volume N_c, à la section efficace σ(ε) des électrons dans le gaz et à la vitesse des particules projectiles V_p (électrons), la fréquence de collision ν est donné par : (Site Internet 3)

$$\nu = N_c \times \sigma(\varepsilon) \times V_p(\varepsilon)$$

Avec ε l'énergie cinétique des électrons.

La tension appliquée entre les deux électrodes permettant d'observer une réaction dans l'enceinte prend des valeurs entre 600 Volts et 3000 Volts donnant ainsi l'énergie cinétique des électrons (l'énergie thermique étant négligeable) à la sortie de la cathode. Soit, entre 600 ev et 3000 ev.

Considérant le gaz comme parfait, la densité de particule cible est :

$$N_c = \frac{P}{k_b \times T} = 2,41 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$$

P : Pression

k_b : Constante de Boltzmann

T : Température

La vitesse des électrons en fonction de leur énergie est donnée par la relation bien connue :

$$V_p = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

E : Energie des électrons

m : masse de l'électron

Les sections efficaces σ(ε) d'ionisations sur l'azote moléculaire indiquent que les électrons ionisent le milieu gazeux quasi-instantanément. Ces valeurs dominantes pour des énergies de l'ordre de plusieurs centaines d'électronvolt sont en accord avec le fait que le champ électrique s'annule très rapidement en sorti de cathode. Il en résulte que l'énergie des électrons décroît considérablement.

Ces plus basses énergies lance le processus d'excitation des molécules N₂ et N₂⁺ cette dernière résultante de l'ionisation.

Les réactions d'excitations concernent principalement les bandes d'énergie fondamentales suivantes :

- (N₂) ; A³Σ → B³Π
- (N₂) ; B³Π → C³Π
- (N₂⁺) ; X²Σ → B²Σ

Le libre parcours moyen L_m des électrons lors du processus d'ionisation et du processus d'excitation est donné par la simple relation (Site Internet 3) :

$$L_m = \frac{V_p}{\nu}$$

Les valeurs de fréquence de collision et de libre parcours moyen des électrons lors de l'ionisation du gaz sont convaincantes. Soumis à une différence de potentiel de plusieurs centaines de volts, les électrons possède un libre parcours moyen situé entre 1,5 cm et 5 cm. On observe aussi en dessous de 30 électronvolts que les électrons ne sont plus susceptibles de ioniser le milieu.

Les résultats concernant l'excitation des molécules sont beaucoup moins exploitables et demandent une étude plus approfondie de la physique des plasmas.

Les sections efficaces, les fréquences de collisions et la répartition du libre parcours moyen selon l'énergie des électrons sont données pour les réactions d'ionisations en annexe 4. (Site Internet 4)

3.1.4 Elément de spectroscopie et couleurs.

La planeterrella ayant la singularité de créer des phénomènes physiques observable dans le visible, il est intéressant de pouvoir identifier les différentes couleurs produites. L'étude collisionnelle renseigne déjà sur ces éléments spectroscopiques. En effet les raies émises par les processus de désexcitation pour les réactions précédemment introduites sont connues :

De source sûre, les raies émises lors de la décharge dans le plasma ont les caractéristiques suivantes :

- (N₂^{*}) ; B³Π → A³Σ : Cette réaction produit l'essentiel des couleurs observées. Selon les différents niveaux vibrationnels de l'état B³Π, la lumière émise se situe entre environ 550 nm (vert-jaunâtre) et le proche infrarouge 750 nm. On observe effectivement surtout du rose et du rouge parfois très intense. La couleur verte est également visible lorsque l'on expérimente à très basse pression (≈ 2 × 10⁻² mb).
- (N₂^{*}) ; C³Π → B³Π : Cette réaction produit un rayonnement UltraViolet. La désexcitation fondamentale (niveaux vibrationnels 0) émet une longueur d'onde de 337 nm. Les sections efficaces d'excitation de l'azote moléculaire montre que le rayonnement UltraViolet est dominant.
- (N₂⁺) ; B²Σ → X²Σ : Cette dernière émet dans la limite de l'UltraViolet avec une désexcitation fondamentale émettant à 391.4 nm. Les différents niveaux vibrationnels accessibles permettent d'expliquer l'observation d'une lueur bleutée ou violette à la limite du visible.

Remarque : L'enceinte en matériaux plexi stoppe ces rayons nocifs. K.Birkeland mort à l'âge de 40 ans a sûrement été « victime » de son expérience.

Une première analyse spectroscopique (délicate) a révélé une raie émise au environ de 400 nm. Une analyse complète et plus rigoureuse est un des objectifs à atteindre avant la fin du stage la difficulté étant d'insérer la fibre du spectromètre à l'intérieur de l'enceinte sans générer de fuite de gaz.

3.2 Etude de trajectoires.

Carl Stormer (1874-1957) était un physicien norvégien. Il a étudié le mouvement des particules électrisées dans la magnétosphère et le mécanisme de formation des aurores polaires. Collaborant avec K. Birkeland, C. Stormer a mené un dur travail théorique afin d'établir les équations de trajectoires des électrons dans l'expérience de K. Birkeland : la Terrella. La correspondance entre les équations et les observations sur la Terrella est remarquable. Ces équations ont été publiées en 1955 dans un ouvrage scientifique dont il est l'auteur : *The Polar Aurora*. (1955)

Dans des conditions similaires à l'expérience de K. Birkeland, ces équations peuvent être reprises et appliquées à la Planeterrella. Le champ électrique s'annulant rapidement, les électrons sont uniquement soumis au champ magnétique et au effet de collision dans l'enceinte à vide. Cependant les équations du mouvement sont établies avec une bonne approximation dans l'état stationnaire.

3.2.1 Les équations de mouvement d'un électron dans un champ magnétique dipolaire.

Soit un dipôle magnétique (aimant) placé à l'origine du système de coordonnées. L'axe magnétique du dipôle est selon l'axe Z le pôle nord vers $z \geq 0$.

Rappel, la force magnétique est : $F = qv \times B = m \frac{d^2 r}{dt^2}$

Le champ magnétique du dipôle au point x, y, z a des composantes égales à $\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial z}$ où $V = M \times \frac{z}{r^3}$

M : Moment dipolaire de l'aimant.

Ces composantes donnent accès à un système d'équation décrivant la trajectoire d'une particule chargée de vitesse v soumis au champ dipolaire suivant les axes OX OY OZ.

$$r^5 \frac{d^2 x}{ds^2} = 3yz \frac{dz}{ds} - (3z^2 - r^2) \frac{dy}{ds}$$

$$r^5 \frac{d^2 y}{ds^2} = (3z^2 - r^2) \frac{dx}{ds} - 3xz \frac{dz}{ds}$$

$$r^5 \frac{d^2 z}{ds^2} = 3xz \frac{dy}{ds} - 3yz \frac{dx}{ds}$$

Où s est l'arc de la trajectoire : $s = vt$

Face à une symétrie des trajectoires entre les charges positives et négatives, une importante réduction a été réalisée pour obtenir ce système. On a défini une nouvelle unité de longueur que l'on prend égal à 1 cm (CGS). La réduction étant : $Cst = \sqrt{\frac{M\epsilon}{mv}} \dots centimètres$ Avec $\epsilon = -e$ afin de ne considérer que le mouvement des électrons.

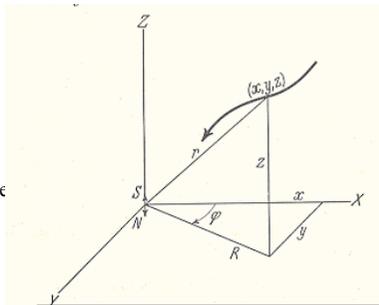


Fig.1 Orientation du système de coordonnées.

Incérant au repère les coordonnées R et φ , définies sur la figure 1, on obtient une équation facilement intégrable appelée « première intégrale » : $x = R \cos \varphi$; $y = R \sin \varphi$

$$R^2 \frac{d\varphi}{ds} = 2\gamma + \frac{R^2}{r^3} \quad \gamma \text{ étant la constante d'intégration pouvant prendre des valeurs de } -\infty \text{ à } +\infty$$

Considérons maintenant les trajectoires des électrons dans le plan équatorial du dipôle. $r=R$ et $Z=0$

Le système devient alors :

$$R^5 \frac{d^2 x}{ds^2} = R^2 \frac{dy}{ds}$$

$$R^5 \frac{d^2 y}{ds^2} = -R^2 \frac{dx}{ds}$$

La force magnétique étant toujours perpendiculaire au plan xy , la vitesse v des électrons reste constante. V^2 est également constante, on peut écrire :

$$\left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 = 1$$

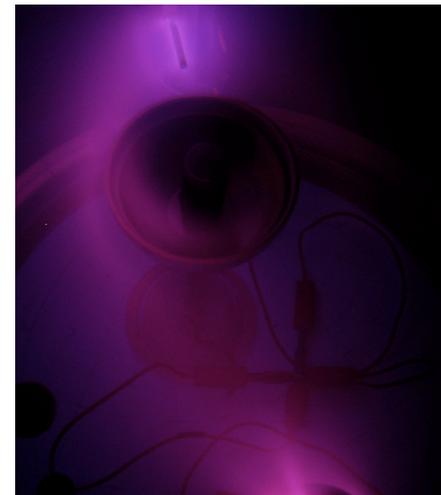
Le rayon de courbure ρ est donné par l'équation :

$$\frac{1}{\rho^2} = \left(\frac{d^2 x}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{ds^2}\right)^2$$

En combinant les trois dernières équations, on remarque une remarquable propriété sur les trajectoires des électrons dans le plan équatorial du dipôle. Le rayon de courbure ρ est proportionnel à la distance R au cube. Différents types de trajectoires dans le plan équatorial sont montrés en [Annexe 5](#).

$$\rho \propto R^3$$

Cette propriété est identifiée avec la Planeterrella. On voit ici la courbure dans le plan équatorial de l'aimant placé au centre.



3.2.2 Régions permises et interdites.

Nous étudions maintenant les trajectoires dans toutes les régions de l'espace.

Reprenons la « première intégral » :

$$R^2 \frac{d\varphi}{ds} = 2\gamma + \frac{R^2}{r^3}$$

Nous pouvons trouver une très intéressante propriété géométrique sur les trajectoires donnée pour chaque valeur de la constante d'intégration γ .

L'angle θ indiqué sur la figure est l'angle entre la tangente au mouvement de la particule et le plan méridien suivant la particule. Nous avons alors :

$$\sin \theta = R \frac{d\varphi}{ds}$$

Nous obtenons alors :

$$\sin \theta = \frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3}$$

Par cette équation il se dessine deux régions car $-1 \leq \sin \theta \leq 1$: Certaines de ces régions figure en [Annexe 6](#).

- Les régions dites « permises » représentent les points de l'espace dans laquelle les électrons peuvent pénétrer :

$$-1 \leq \frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} \leq 1$$

-Les régions dites « interdites » représentent les zones de l'espace qui ne peuvent contenir de trajectoires :

$$\frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} < -1$$

$$\frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} > 1$$

On voit ici la correspondance établit entre la théorie et l'expérimentation. Les zones blanches représentent l'espace « permis », en noir l'espace « interdit ». (1955)

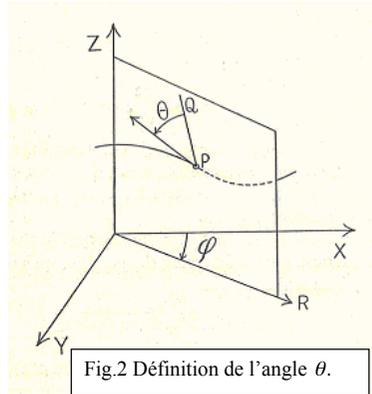


Fig.2 Définition de l'angle θ .

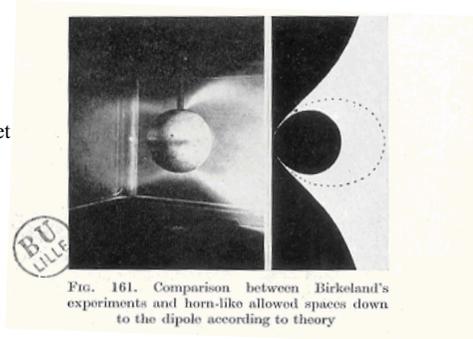


FIG. 161. Comparison between Birkeland's experiments and horn-like allowed spaces down to the dipole according to theory

Conclusion :

Lors d'un séjour d'une année au Canada, j'ai pu assister à l'étonnante apparition d'aurore boréale. J'ai alors voulu essayer de comprendre les mécanismes physiques régissant ce phénomène naturel.

Découvrant la Planeterrella de J.Lilensten, j'ai pris beaucoup de plaisir à effectuer ce stage de Master 1 et à pratiquer selon ses termes, une physique du XIX^{ème} siècle.

La diversité des applications de cette expérience, soit pour le développement vers le grand public, soit pour la compréhension des phénomènes physiques, lui prédit un avenir prometteur.

Il reste cependant un lourd travail à effectuer afin d'exploiter tout le potentiel de cette manip. Les problèmes révélés durant mon étude, en particulier sur la configuration magnétique associée à la plus grande des deux sphères, demande de faire preuve d'ingéniosité pour les résoudre. Une fois ce travail d'étalonnage terminé, des systèmes physiques existant pourront être simulés. Par exemple des systèmes particuliers comme Neptune et Uranus avec leur axe magnétique incliné ou bien des systèmes planètes satellites magnétisés pourraient être l'objet d'une étude que la Planeterrella promettrait de réaliser.

J'ai beaucoup apprécié participer au développement de la Planeterrella et d'avoir eu l'occasion de la faire partager au public lors des journées ouverte « La bastille dans les étoiles ». J'espère maintenant continuer au mieux mon travail. Procéder à l'analyse spectroscopique complète, répertorier un maximum d'observation et établir une description détaillée des coûts pour la construction d'une Planeterrella constitue pour moi de réels objectifs à atteindre pour la fin de ce stage.

Je remercie tout d'abord J.Lilensten pour m'avoir fait découvrir une physique en laboratoire passionnante et pour ces nombreux encouragements.

Je remercie toutes les personnes du Laboratoire de Planétologie de Grenoble pour leur accueil. En particulier O.Brissaud pour ces nombreux conseils techniques, P.Volke pour ses services informatiques et toute l'équipe de recherche dont M.Barthélemy et G.Gronoff. Je n'oublierai pas de citer O.Dutuit la directrice, A.Mokhtari la secrétaire du laboratoire ainsi que tous les stagiaires, thésards et chercheurs pour leur bonne humeur.

Je remercie également G.Mejean, A.Campargue, J.Derouard et N.Sadeghi du Laboratoire de Spectroscopie de Grenoble qui ont su m'accueillir avec intérêt et qui m'ont apporté de nombreux éléments sur la Physique des Plasmas.

Bibliographie :

- J.DE MAIRAN, *Traité physique et historique de l'aurore boréale [Document électronique]*, Imprimerie royale, 1733, Edition de Paris, 1995
- C.STORMER, *The Polar Aurora*, Clarendon press, 1955.
- R.PAPOULAR, *Phénomènes électriques dans les gaz*, Monographies Dunod, 1962
- J.LILENSTEN, P-L.BLELLY, *Du Soleil à la Terre*, Presse Universitaires de Grenoble, 1999.
- J.LILENSTEN, J.BORNAREL, *Sous les Feux du soleil*, EDP sciences, 2001.
- W .BURKE, *Kristian Birkeland The First Space Scientist*, Springer, 2005.

Site Internet:

- 1/ <http://lpg.obs.ujf-grenoble.fr/>
- 2/ <http://www.catastrophism.com/texts/birkeland/>
- 3/ <http://web.ujf-grenoble.fr/PHY/intra/Formations/M2/Physique-ingenieries/M2Pro/PLASMA/PHY529p/>
- 4/ <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Ionization/molTable.html>
- 5/ http://www.ens-lyon.fr/DSM/magistere/projets_biblio/2003/lblaise-/node18.html