

*Université Joseph Fourier Grenoble 1  
Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble  
M1 Sciences de la Terre et de l'Environnement  
Spécialité Terre Solide*

---

# Simulation numérique du comportement des électrons dans la Planeterrella

- Cas des ionisations -

---

Anne Vialatte  
*Stage encadré par Mathieu Barthélemy*





## Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier Mathieu Barthélemy pour m'avoir offert l'opportunité de faire ce stage. La Planeterrella est une expérience fascinante et c'est pour moi une joie d'avoir pu apporter mon petit grain de sable à son édifice. Merci d'avoir été si disponible, que ce soit pour répondre à mes questions, ou tout simplement d'avoir été là, dans les mauvais moments comme dans les bons.

Je voulais ensuite remercier Jean Lilensten d'être aussi passionné. C'est un vrai plaisir de rencontrer quelqu'un d'aussi intéressé et intéressant, et découvrir la Planeterrella à ses côtés fut une expérience captivante.

Un merci global à toute l'équipe Planéto, et particulièrement aux autres stagiaires et doctorants (trop nombreux pour tous les citer), dont la bonne humeur a fait de ce stage une expérience plus qu'agréable.

Enfin, merci à l'équipe de foot de l'IPAG (jambes cassées comprises) pour ces matchs dont on reparlera encore l'année prochaine (ou pas) !

## Résumé

L'expérience de la Terrella, reproduisant le phénomène des aurores polaires pour le système Terre-Soleil, mais également pour d'autres configurations (comme Uranus ou Jupiter) a permis l'observation de concepts physiques jusqu'à présent non reproduits en laboratoire. L'idée de pouvoir recréer ces observations dans un environnement virtuel, où toutes les conditions sont contrôlées, devient alors très importante. En effet, la modélisation devient alors un moyen de vérifier la véracité des hypothèses faites dans le cadre de l'expérience. Elle permettrait également d'avoir un point de vue différent sur certaines manifestations du champ magnétique, et surtout une meilleure compréhension des magnifiques phénomènes naturels que sont les aurores polaires.

## Abstract

The Planeterrella experiment is a wonderful tool able to reproduce the phenomenon of polar lights for different configurations, such as the Sun-Earth system for example. It has allowed scientists to study some physical concepts which haven't been observed in laboratory conditions so far, such as the magnetopause. The numerical simulation become then a priority in order to recreate these observations, while checking that the hypothesis made about the Planeterrella experiment are true. This simulation, coupled with the study of the phenomenon inside the experiment would also allow a better understanding of the wonderful gift that is the aurora.

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>I) Historique de la Terrella, de Birkeland à nos jours</b> .....	<b>7</b>
1) Les aurores.....	7
2) La Terrella .....	8
3) La Planeterrella .....	9
<b>II) La modélisation numérique</b> .....	<b>12</b>
1) Principes physiques mis en jeu .....	12
<i>a) Le gaz</i> .....	12
<i>b) Les électrons</i> .....	12
<i>c) Les collisions</i> .....	13
<i>d) Champs magnétique et électrique</i> .....	14
2) La création du code .....	15
<b>III) Prise en compte de la population ambiante atomique</b> .....	<b>17</b>
<b>IV) Discussion et Perspectives</b> .....	<b>19</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>20</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>21</b>

## Introduction

La Planeterrella est une expérience fascinante. Au départ promotrice de la formation scientifique, elle est devenue aujourd'hui un indéniable atout pour la recherche en physique de la haute atmosphère. Les phénomènes observés grâce à elle sont de plus en plus complexes, et la création d'une simulation numérique reproduisant le comportement des particules en son sein devenait une évidence.

Cela fait maintenant 3 ans que ce projet fut mis en route par Mathieu Barthélemy, et la complexité du code gérant la simulation augmente petit à petit, s'étoffant de manière à correspondre de plus en plus aux observations faites dans l'expérience.

Ce stage se place dans un cas très particulier dont le but est de prendre en compte une population particulière d'électrons, créés lors du phénomène d'ionisation.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il convient de rappeler quelles sont les origines de l'expérience, mais également les hypothèses physiques choisies lors de la création du code. Ensuite nous étudierons l'architecture du code et la manière par laquelle j'ai tenté d'introduire les ionisations, qui, nous le verrons, ne semble pas se révéler pertinente.

## I) Historique de la Terrella, de Birkeland à nos jours

Parfois annonciatrices de catastrophes, reflets des armures des Walkyries ou encore sentier suivis par des animaux divins, les aurores polaires ont de tout temps fasciné les Hommes. Mais leur étude scientifique ne débuta qu'à partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, et c'est d'ailleurs à cette période que le nom d'aurore boréale fut utilisé pour la première fois. Dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle, on suppose le champ magnétique terrestre d'être à l'origine de ces phénomènes. On connaît aujourd'hui le secret de ces manifestations lumineuses grâce aux très nombreuses études scientifiques effectuées au cours de ces derniers siècles.

### 1) Les aurores

Lors d'un orage solaire, un flux de particules chargées (électrons, protons, ions) éjectées par le soleil entre en collision avec la magnétosphère, le bouclier magnétique entourant la Terre.

Ces particules électrisées à haute énergie peuvent alors être captées et canalisées par les lignes de champ magnétique terrestre pour arriver dans les

« cornets polaires ». Elles excitent, ou ionisent, les atomes de gaz présents dans cette partie de l'atmosphère terrestre, ce qui lui donne son nom : l'ionosphère. Celle-ci est donc composée de gaz partiellement ionisés, et est située entre 80 et 800km d'altitude. C'est dans cette zone qu'auront lieu les phénomènes d'aurores polaires.

Les molécules de gaz excitées par le plasma solaire ne pourront rester dans cet état instable, et finiront par se désexciter, émettant alors un photon d'énergie égale à  $h\nu$ ,  $h$  étant

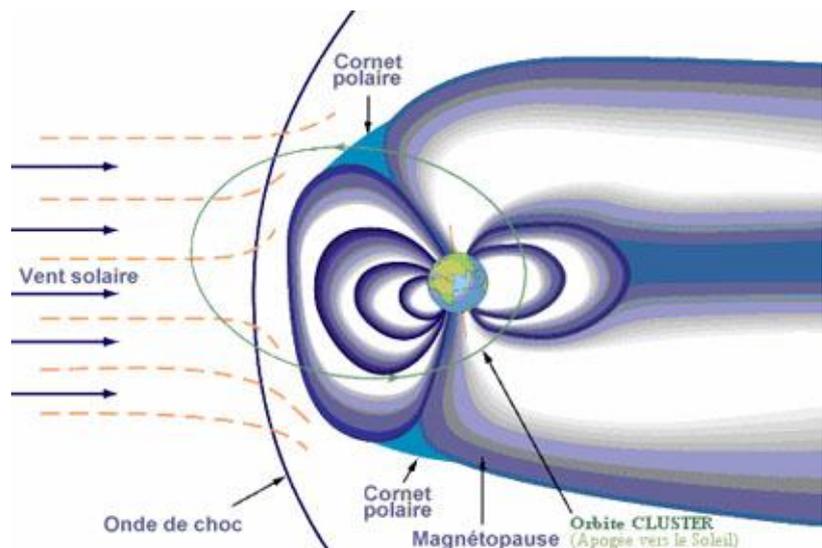


Figure 1 : Image représentant la structure simplifiée de la magnétosphère terrestre. (site du CNES : <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/640-des-flux-de-particules.php>)

la constante de Planck ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s) et  $\nu$  la longueur d'onde. C'est pour cette raison que l'on peut observer une si grande variété de formes et de couleurs pour les aurores polaires : les longueurs d'ondes dépendent de la molécule mise en jeu (principalement  $N_2$ , O,  $O_2$ ), mais également de son état d'excitation. On sait également que la pression, et donc l'altitude a un effet sur la densité moléculaire.

Tous les 11 ans environ, on observe un pic d'activité solaire, où les vents de particules venus de notre étoile sont bien plus « violents » que d'habitude. Ces circonstances exceptionnelles amènent à des aurores exceptionnelles, avec des phénomènes auroraux visibles jusqu'à  $10^\circ$  de latitude (comme à Singapour en 1909).

## 2) La Terrella

C'est en 1896 que Kristian Olaf Birkeland (1867 – 1917) publie sa théorie dans laquelle il suppose que des faisceaux d'électrons (appelés rayons cathodiques à l'époque) sont émis du soleil, attrapés par le champ magnétique terrestre et contraints de converger vers les pôles où ils produiront les aurores en rentrant en contact avec l'atmosphère.

Malheureusement, sa théorie pourtant exacte n'est pas très bien reçue par la communauté

scientifique, et il décide alors en 1901 de monter une expérience afin de prouver son point de vue : c'est ainsi que naîtra la première Terrella. Il en construira 17, avec différentes chambres à vide de différentes tailles et formes. Mais le principe de son expérience reste le même : une sphère aimantée est suspendue dans une enceinte en verre où l'on fait le vide (10Pa). Il envoyait alors un faisceau d'électrons en direction de la sphère, et on voyait ainsi apparaître deux cercles lumineux près des pôles de celle-ci. Dans sa conception, la sphère magnétique représentait la Terre et le faisceau d'électrons le soleil.

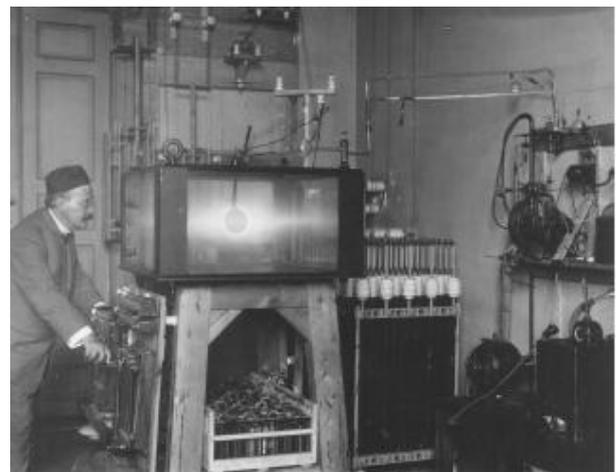


Figure 2 : Birkeland en train de réaliser une démonstration de la Terrella. (d'après Liliensten et al., 2013)

### 3) La Planeterrella



Figure 3 : La Planeterrella aujourd'hui (données personnelles)

Ce n'est que bien plus tard que l'expérience de la Terrella fut redécouverte. Jean Lilensten, directeur de recherches à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG), et ses collègues décidèrent de la remettre au goût du jour en prenant en compte les découvertes physiques plus modernes mais également des avancées technologiques afin de créer la Planeterrella. Plusieurs changements sont effectués par rapport à la Terrella de Birkeland. Il n'y a plus une mais deux sphères présentes dans l'enceinte, permettant ainsi

aux chercheurs d'étudier différents cas de figure d'interactions entre étoiles. De plus, ces sphères

autrefois suspendues dans l'enceinte sont désormais posées sur un support. De cette manière, il est possible de les faire bouger très facilement durant l'expérience grâce à un ingénieux système d'aimants. Il est également prévu de trouver un système permettant la rotation des sphères sur elles-mêmes. Enfin, les chercheurs de l'équipe Planéto de l'IPAG ont choisi de donner une forme de cloche à l'enceinte, afin d'améliorer l'esthétique de l'installation (d'abord en plexiglas, puis en verre).

En effet, cette caractéristique est cruciale, la Planeterrella étant au départ un moyen de vulgarisation scientifique pour le grand public. Des spectacles furent créés mettant en scène l'expérience. Ceci permit au concept de se répandre, et de nombreuses versions de la Planeterrella sont maintenant utilisées dans le monde entier. Son intérêt scientifique n'est apparu qu'un peu plus tard, lorsque les chercheurs se sont rendus compte qu'elle pouvait avoir un rôle dans la compréhension des aurores, qu'elles soient terrestres ou sur d'autres planètes. C'est dans cette optique que se place le projet de modélisation numérique de la Planeterrella.

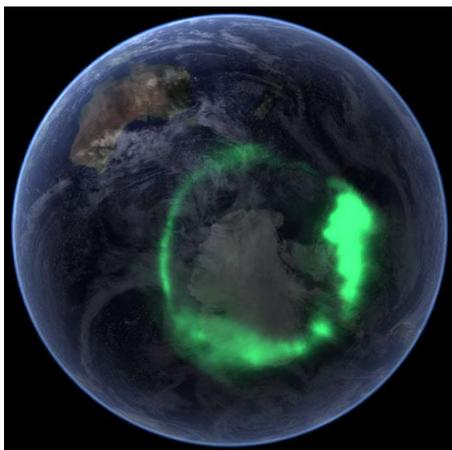
La maquette de Planeterrella II, telle qu'on peut la voir sur la Figure 3, construite par l'équipe de Jean Liliensten à l'IPAG a les caractérisations suivantes :

- Volume de l'enceinte en verre : 50L
- Diamètre de l'enceinte : 50 cm
- Diamètre de la petite sphère : 5 cm
- Diamètre de la grande sphère : 10 cm

Ces caractéristiques permettent de reproduire au mieux les phénomènes d'aurores polaires.

Pour commencer, il faut faire le vide au cœur de l'enceinte à l'aide d'une pompe à vide. La pression au sein de l'ionosphère terrestre est d'environ 2 Pa à 60km, et on peut arriver à une pression dans l'enceinte de 2,5 Pa, ce qui est une approximation correcte. Mais il est intéressant de modifier cette pression afin de pouvoir observer différents phénomènes.

Il faut ensuite pouvoir arracher les électrons de l'élément jouant le rôle du soleil (soit une sphère, soit la buse). Pour cela on applique une différence de potentiel importante (pouvant monter jusqu'à 700V) entre les différents objets du montage. On peut observer différents phénomènes en fonction des types d'assemblage que l'on peut faire.



Dans le cas où la buse est la source, on observe des cercles autour des pôles de la sphère qui joue le rôle de la Terre. Ce phénomène est clairement celui des ovales auroraux que l'on peut observer grâce à des images satellites (voir Figure 4).

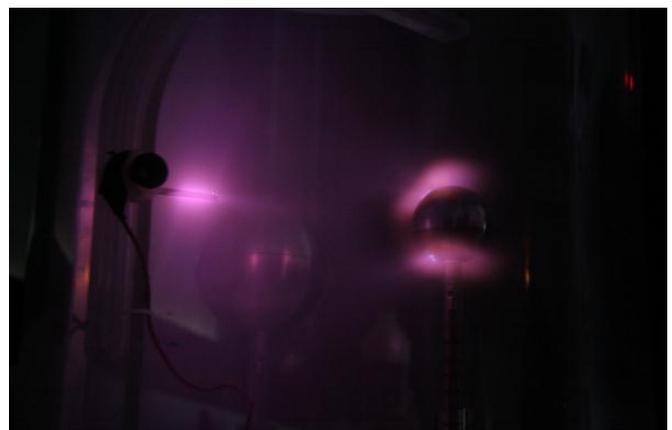


Figure 4 : A droite : visualisation des ovales auroraux dans la Planeterrella (<http://planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/>). En haut : Ovale auroral pris par le satellite IMAGE en 2005 suite à un pic d'activité solaire (<http://earthobservatory.nasa.gov>).

On peut également utiliser l'une des sphères en tant que soleil, tandis que l'autre joue le rôle de la planète. Un phénomène intéressant à observer dans cette configuration est la magnétopause. Si les aimants dans les sphères sont placés de manière à ce que le nord magnétique soit en haut dans une des sphères, et en bas dans l'autre, et que l'on rapproche les sphères l'une de l'autre, on peut réussir à observer une « onde de choc », comme présenté sur la Figure 5. Cette « barrière » lumineuse visible ici ne peut être observée nulle part ailleurs ! En effet, la densité moléculaire est trop faible à haute altitude pour permettre la création de lumière. C'est ainsi la première fois que l'on peut voir de nos propres yeux la frontière entre la magnétosphère, dominée par le champ magnétique de la planète, et le milieu interplanétaire.



Figure 5 : Visualisation de la magnétopause avec la Planeterrella.  
(<http://planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/>)

Bien que de nombreuses autres configurations soient possibles, il serait beaucoup trop long de toutes les présenter ici. C'est dans le prolongement de cet aspect de découverte et d'observations de processus physiques que se place la modélisation numérique. Tout comme les observations aident à former des théories, la simulation informatique peut également nous apprendre beaucoup sur le comportement des électrons au sein de la Planeterrella.

## II) La simulation numérique

### 1) Principes physiques mis en jeu

Lors de la réalisation d'une simulation numérique, il est primordial de comprendre la physique qui régit le système étudié. La Planeterrella nous permet d'aborder différents aspects physiques, dont notamment les états quantiques des molécules. Sans entrer dans les détails, il s'agit ici de comprendre de manière simple quels sont les paramètres importants qui régissent l'expérience, et la manière de les intégrer au programme.

#### a) Le gaz

Une des caractéristiques les plus importantes de l'expérience est le gaz présent dans l'enceinte. En considérant celui-ci comme étant parfait, et en prenant une température ambiante de 295K et une pression égale à celle que l'on trouve à environ 100km d'altitude, on peut facilement trouver la densité moléculaire en présence. Cet élément est important pour le calcul des sections efficaces, paramètre entrant en jeu dans le calcul des collisions. En effet une section efficace est une grandeur physique liée à la probabilité d'interaction d'une particule.

Dans le cadre de la modélisation numérique, nous avons considéré la densité moléculaire comme étant constante dans l'enceinte de la Planeterrella. Cette condition fut choisie afin de simplifier au mieux le programme.

#### b) Les électrons

Dans la Planeterrella, nous sommes en présence de 2 types d'électrons :

- Les électrons émis par la buse, à haute énergie, que l'on nommera suprathermiques. Ils ont une énergie moyenne d'environ 800 eV, ce qui correspond à environ 6% la vitesse de la lumière (Lilensten et al., 2008). Ce n'est donc pas la peine de prendre en compte les principes relativistes.

- La deuxième catégorie d'électrons sont ceux créés par ionisation des molécules de gaz. Ils ont donc une énergie inférieure à celle des électrons suprathermiques. On appelle cette catégorie la population ambiante électronique (Lilensten et al., 2008).

Dans le cadre de la simulation numérique, les électrons suprathermiques étaient initialement les seuls pris en compte. Nous reviendrons sur la population ambiante électronique dans la suite de ce rapport.

### c) Les collisions

Des collisions entre électrons et le gaz ( $N_2$ ,  $O_2$ ) peuvent avoir lieu. Il y a deux grands types de collisions :

Les collisions élastiques, qui impliquent uniquement un changement de direction pour l'électron, sa vitesse et donc son énergie étant conservées.

Les collisions inélastiques, impliquant cette fois-ci une perte d'énergie pour l'électron. Plusieurs types de ces collisions peuvent avoir lieu :

- Dissociation : Cette interaction est en fait une cassure moléculaire, où une molécule de  $O_2$  (ou  $N_2$ ) devient deux atomes de O (ou N). Cette réaction est assez rare.

- Excitation : C'est le passage d'un état stable à un état excité pour une molécule de gaz. Ne pouvant rester dans cet état instable, elle le redeviendra grâce à l'émission d'un photon. C'est cette réaction qui donne lieu au phénomène des aurores.

- Absorption : C'est le cas où un électron se fait piéger par une molécule de gaz, où il ira combler un vide, potentiellement créé par une ionisation. Dans le cas de la simulation, cette collision n'est (pour l'instant) pas prise en compte.

- Ionisation : Cela correspond au choc entre un électron suprathermique et un autre situé dans la couverture électronique d'une molécule. Si l'énergie incidente est suffisante, l'électron moléculaire est éjecté de celle-ci. Il peut alors lui aussi entrer en collision avec le gaz. C'est à ce cas particulier que je me suis intéressée, en voulant prendre en compte cet électron secondaire dans la simulation numérique.

## d) Champs magnétique et électrique

Les aimants placés dans les sphères créent forcément un champ magnétique, de la même manière que le flux d'électrons implique un champ électrique. A l'heure actuelle, seul le champ magnétique est pris en compte dans la simulation numérique. En effet, nous avons considéré le champ électrique comme étant négligeable loin de la source (Lilensten et al., 2008). Mais les très nombreuses simulations ont montré que cette hypothèse n'était pas vérifiée, et que l'effet du champ électrique, même local aux alentours de la source des électrons, doit être pris en compte. Ceci est montré par les trajectoires des électrons obtenues dans la modélisation, qui ne correspondent absolument pas aux observations que l'on peut voir dans la Planeterrella.

Mais ceci ne nous empêche pas de pouvoir observer certains concepts comme par exemple le rayon de Larmor. Il s'obtient en appliquant le principe fondamental de la dynamique à une particule située dans un champ magnétique B constant. On obtient alors la

$$\text{formule suivante : } R = \frac{\sqrt{2mE}}{qB}$$

On peut essayer de calculer de manière approximative ce rayon dans le cas de notre expérience en prenant :

$m=1.10^{-30}$  kg ;  $q=2.10^{-19}$  C ;  $E= 500 \times 2.10^{-19}$  J ;  
 $B = 3.10^{-3}$  T, pour une particule située à 5 cm de l'aimant

On obtient alors une valeur de  $R= 2.10^{-2}$  m, soit 2 cm.

La Figure 6 nous montre ici la trajectoire effectuée par un électron. Elle a été obtenue par simulation numérique. Il est intéressant de noter que la spirale observée au centre de l'image permet donc d'illustrer le principe du rayon de Larmor.

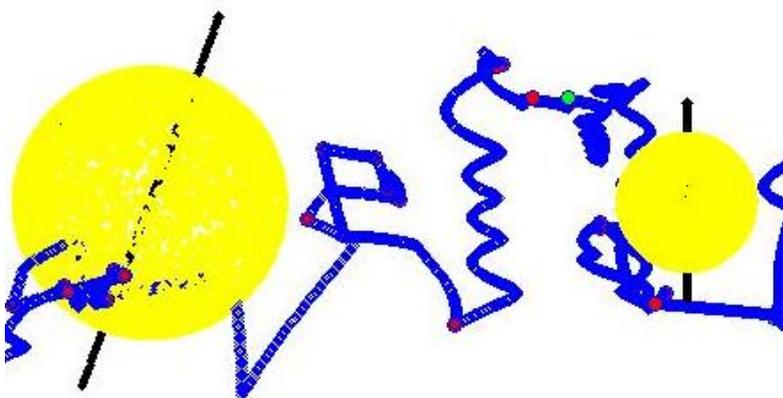


Figure 6 : Image obtenue grâce à la simulation numérique mettant en évidence le rayon de Larmor

Notre code n'est donc pas faux, mais il lui manque encore quelques conditions afin de pouvoir être réaliste et physiquement vrai. La partie suivante a donc pour rôle d'expliquer l'architecture de celui-ci, et d'expliquer le fonctionnement global de la modélisation.

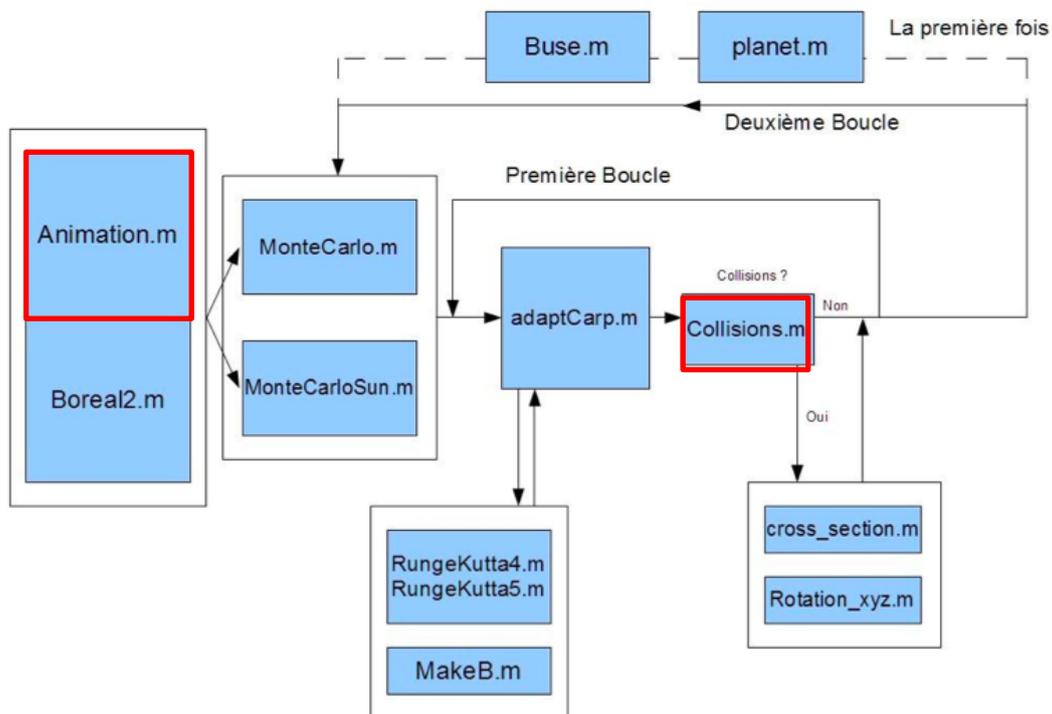
## 2) La création du code

Le but de cette simulation est de modéliser la trajectoire et le comportement d'un électron au sein de l'expérience de la Planeterrella. Ce projet fut initialisé par deux étudiants du M2 d'Astrophysique en 2011. Ylva Götberg et Solenn Vaupré, mirent en place les bases de la simulation, et commencèrent par tracer uniquement la trajectoire de l'électron. En 2012, Enrico Vigna (alors en M1 Science de la Terre et de l'Environnement) introduit le principe des collisions dans la simulation, en insérant un sous-programme responsable des collisions élastiques. Le traitement des collisions inélastiques fut ajouté par Cyril Bernerd (L3 Physique-Chimie) au début de cette année 2013.

Mais avant de pouvoir ajouter quelque contribution à ce projet, il faut tout d'abord comprendre le fonctionnement de cette modélisation. L'image ci-après (Figure 6) représente l'organigramme de fonctionnement de celle-ci. La manière de procéder est la suivante :

- Les sous-programmes MonteCarlo et MonteCarloSun créent une position et une vitesse aléatoire à l'électron, qui seront ses conditions initiales (sa position sera fixée en fonction des conditions choisies préalablement : soit sur la buse, soit sur l'une des sphères).
- Les deux fonctions RungeKutta4 et RungeKutta5 sont des méthodes de résolution d'équations différentielles qui permettent de calculer dans le fichier adaptCarp la position de l'électron après un temps  $dt$ . Le sous-programme MakeB permet lui de calculer le champ magnétique en tout point de la Planeterrella.
- Une fois la nouvelle position calculée, la fonction Collision calcule la probabilité de collision entre l'électron et les particules de gaz environnantes. S'il y a collision, les électrons subissent un changement de direction calculé de manière aléatoire grâce à la fonction Rotation\_xyz. Si la collision est inélastique, l'électron se voit subir une baisse de son énergie, définie dans le fichier cross-section.

Le fichier Animation est la pièce centrale de la simulation. En effet, les conditions initiales et aux limites telles que la taille des sphères ou les limites de l'enceinte sont indiquées à cet endroit. C'est également dans cette partie du programme que l'on peut choisir la configuration que l'on souhaite étudier (présence d'une ou deux sphères, quelle est la source des électrons, et le nombre initial d'électrons suprathermiques). Il intègre tous les résultats obtenus et génère un graphique montrant les résultats.



### Organigramme du code

Figure 7 : Organigramme présentant l'architecture de la simulation numérique de la Planeterrella. (Vigna, 2012). Les sous-programmes entourés en rouge sont ceux où je suis intervenue dans le cadre de la prise en compte de la population ambiante électronique.

Les sous-programmes entourés en rouge sur la Figure 7 sont ceux où je suis intervenue afin de prendre en compte la population ambiante électronique.

### III) Prise en compte de la population ambiante électronique

Dans le cas d'une ionisation, un électron est arraché à une molécule d'O<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>. Ce nouvel électron, que l'on nommera « électron supplémentaire » doit alors être pris en compte dans le programme car cet électron pourra lui aussi entrer en collision avec le gaz. J'ai alors créé un compteur d'électron dans le sous-programme gérant les collisions, que l'on incrémente de 1 à chaque fois qu'une ionisation a lieu. J'ai ainsi pu créer une boucle entourant le programme principal, indiquant de poursuivre tant que le compteur d'électron est différent de 0.

Mais cette méthode présente quelques petits problèmes : premièrement, cela augmente considérablement le temps de calcul. En effet, l'ionisation étant une réaction courante, de nombreux électrons sont créés à chaque boucle. Afin de limiter cet effet, j'ai décidé de créer une condition supplémentaire d'arrêt. Initialement, le programme est prévu pour continuer de tourner tant que l'électron n'est pas sorti de l'enceinte. Or, quand il a une énergie trop faible, ce qui peut arriver après de nombreuses interactions avec le gaz, sa vitesse est trop petite pour lui permettre de réaliser cette condition. J'ai alors créé une valeur d'énergie seuil, facilement modifiable, pour laquelle on considère l'électron comme étant « sorti » de l'enceinte, lorsque son énergie passe en-dessous de cette valeur. Le programme passe alors

au traitement de l'électron suivant.

La Figure 8 ci-contre montre les trajectoires (lignes rose) suivies par 3 électrons différents. Les points de couleur rose indiquent une dissociation et ceux de couleur verte indiquent une ionisation. C'est cette image qui m'a fait prendre conscience d'un problème capital dans la structure présentée dans le

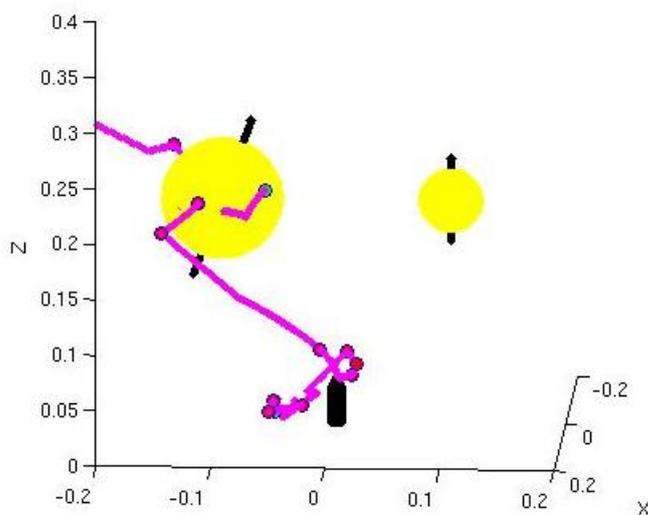


Figure 8 : Image obtenue par simulation numérique illustrant les trajectoires de 3 électrons (en rose) et leurs interactions avec le gaz (points de couleurs rose et vert)

paragraphe précédent. En effet, les électrons supplémentaires sont dans ce cas créés de la même manière qu'un électron suprathermique, c'est-à-dire sur la sphère. Il s'agit donc maintenant de réussir à les faire apparaître à l'endroit où a eu lieu l'ionisation permettant leur création. C'est donc sur ce dernier aspect que c'est orienté la dernière partie de mon stage, mais tous mes essais pour tenter de résoudre ce problème furent jusqu'à présent infructueux.

## IV) Discussion et Perspectives

Face à l'échec de ces dernières tentatives, je me demande si la méthode utilisée est la plus pertinente. A la place de faire une boucle englobant tout le programme principal, peut-être aurait-il mieux valu séparer dès le départ les électrons suprathermiques des électrons supplémentaires créés lors d'une ionisation. Il se peut également que j'aie fait une erreur en écrivant l'algorithme, et que je ne m'en sois pas rendu compte jusqu'à maintenant.

Dans tous les cas, il semble clair que le travail sur cette simulation est loin d'être terminé. Mon stage étant prolongé pendant encore un mois, c'est avec joie que je vais continuer à travailler sur ce projet. La position de départ de l'électron supplémentaire est la priorité, mais je vais également essayer d'aborder la prise en compte des absorptions. En effet, la condition d'arrêt du programme lorsque l'énergie est trop faible marche bien, mais cela n'a pas de réalité physique. Il serait plus pertinent de considérer qu'un électron avec une énergie plutôt faible se recombine avec une molécule de gaz.

Un autre projet serait la prise en compte le champ électrique, via la création d'un sous-programme définissant son action au sein de la Planeterrella. Son effet n'est pas négligeable, et il faut le prendre en compte. Ceci consistera à résoudre l'équation de Laplace dans l'enceinte de la Planeterrella, très certainement grâce à la méthode des éléments finis.

## Conclusion

Au jour de la rédaction de ce rapport, je n'ai malheureusement pas de résultat concret à présenter. J'espère néanmoins débloquer la situation dans la suite de mon stage, afin de commencer à m'intéresser aux absorptions.

Bien que la modélisation fonctionne bien, il y a encore de petites précisions à apporter au code, de manière à ce qu'il corresponde le plus possible à la réalité. La prise en compte du champ électrique est indispensable, et la création du sous-programme gérant ce paramètre semble être la prochaine grande étape de ce projet. On peut d'ailleurs voir que la modélisation, bien qu'incomplète, nous permet déjà d'avancer au niveau des hypothèses entourant l'expérience. Mais l'inverse est vrai également, puisque les observations sont tout simplement la base sur laquelle la modélisation est construite. Cette combinaison de l'expérience avec la simulation numérique est donc un merveilleux moyen d'approfondir nos connaissances sur ces phénomènes prodigieux se produisant dans la haute atmosphère.

## Bibliographie

Bernerd, C., 2013. Planeterrella : modélisation des collisions inélastiques, mémoire de stage de L3 Physique-Chimie. Grenoble : Université Joseph Fourier.

Lilensten, J., Barthélémy, M., Simon, C., Jeanjacquot P., Gronoff, G., 2008. The Planeterrella, a pedagogic experiment in planetology and plasma physics, DOI: 10.2478/s11600-008-0079-x,230-235, Acta Geophysica, vol.57, no. 1, pp. 220-2352008

Lilensten, J., Bornarel, J. (directeurs de redaction). 2001. Sous les feux du soleil, vers une météorologie de l'espace. Paris, France.

Lilensten, J., Provan, G., Grimald, S., Brekke, A., Flückiher, E., Vanlommel, P., Simon Wedlund, C., Barthélemy, M., Garnier, P., 2013. The Planeterrella experiment: from individual initiative to networking, Journal of Space Weather and Space Climate.

Site internet de la Planeterrella, consulté de janvier à juin 2013 : <http://planeterrella.obs.ujf-grenoble.fr/>

Vigna, E., 2012. Simulation numérique des trajectoires des electrons dans la Planeterrella, prise en compte des collisions, mémoire de stage de première année de Master Science de la Terre et de l'Environnement. Grenoble : Université Joseph Fourier.