

Université Pierre et Marie Curie
Master 1 : Physique et ses Applications

Rapport de stage effectué au
Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Recherche de la signature radio de Encelade dans la magnétosphère de Saturne

Avril - Juillet 2012

par Sébastien Viévard
Encadrant : Laurent Lamy
Co-encadrant : Baptiste Cecconi

Introduction

Le stage, que j'ai effectué de mi-avril à mi-juillet 2012, s'est déroulé au Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA) qui est un département de l'Observatoire de Paris, sous la tutelle de ce dernier et du CNRS. Il est aussi affilié aux Universités Pierre et Marie Curie (Paris 6) et Denis Diderot (Paris 7).

Etant l'un des plus gros laboratoires français de recherche en Astrophysique, il a pour objectif la conception et la réalisation d'instrumentation spatiale et au sol, l'exploitation et l'interprétation scientifique des données recueillies par les divers instruments réalisés, ainsi que le développement de techniques avancées qui seront mises en oeuvre dans des projets au sol ou dans l'espace. Il est constitué de plusieurs pôles de recherches axés sur l'étude des étoiles, du Soleil, des planètes, des plasmas et de l'instrumentation en astrophysique. L'équipe qui m'a accueilli fait partie du pôle Physique des Plasmas, qui a deux axes thématiques principaux : l'étude du vent solaire et des magnétosphères planétaires. J'ai été encadré par Laurent Lamy et co-encadré par Baptiste Cecconi, astronomes adjoints. Leurs recherches portent principalement sur les aurores polaires des planètes magnétisées, et les émissions radio basse fréquence.

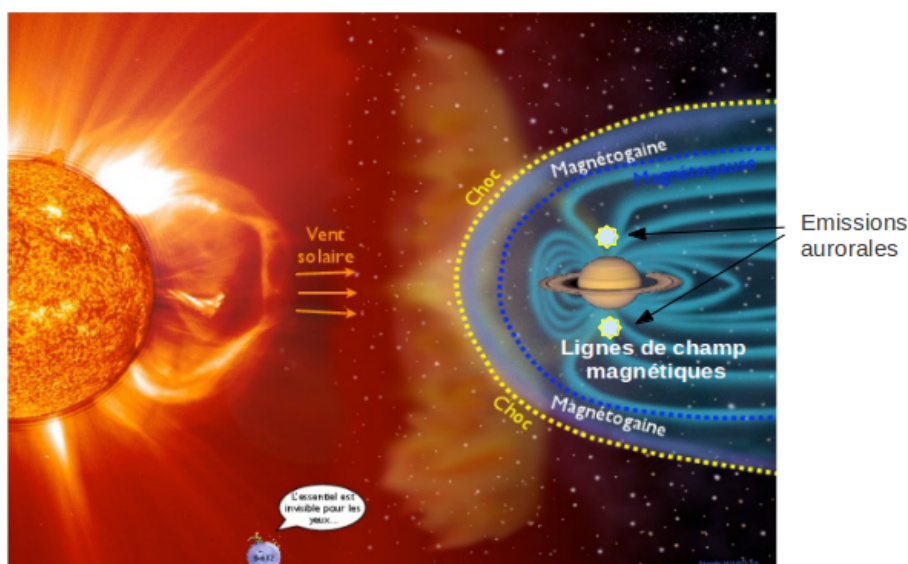


FIGURE 1 – Magnétosphère de Saturne

Sujet et problématique du stage

Magnétosphère et émissions aurorales

L'interaction entre le vent solaire, flux de particules chargées en provenance du Soleil, et le champ interne d'une planète magnétisée génère une magnétosphère. C'est la région où le champ magnétique planétaire prédomine. Comme on peut le voir sur la figure 1, elle a une forme aplatie côté jour (à gauche de Saturne sur la figure), due à sa compression par le vent solaire, et une forme allongée du côté nuit (à droite de Saturne sur la figure). Les magnétosphères sont des laboratoires de physique des plasmas naturels qui sont le siège de processus physiques complexes. Plus particulièrement, les régions de haute latitude sont le lieu de l'émission d'ondes électromagnétiques intenses : ce sont les aurores polaires.

Elles sont générées par des particules chargées (principalement des électrons), qui sont accélérées dans la magnétosphère (à quelques keV) puis guidées le long des lignes de champ magnétique jusque dans les régions aurorales. Sous l'effet du champ magnétique planétaire, ces électrons sont animés de deux mouvements principaux (voir figure 9 en annexe) :

- sous l'influence de la force de Lorentz, $\vec{F}_L = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ avec q la charge, $\vec{v}$ la vitesse de l'électron et $\vec{B}$ le champ magnétique, les électrons ont un mouvement de giration autour des lignes de champ magnétique à la fréquence cyclotron locale (f_{ce}).
- la conservation du moment magnétique, $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$ (avec m la masse de la particule, $v_{\perp}$ la composante de la vitesse normale à la ligne de champ, et B l'intensité du champ magnétique), permet de définir deux points "miroir", entre lesquels les électrons vont "rebondir". La position de ces points le long de la ligne de champ dépend des caractéristiques cinétiques des électrons et de l'intensité du champ magnétique. Lorsqu'un électron atteint son point miroir, sa vitesse parallèle à B change de direction, il est alors "réfléchi".

Quand ces points miroir sont situés dans l'atmosphère, les électrons sont perdus par collision dans le milieu dense qu'ils rencontrent, on dit qu'ils précipitent. Ils provoquent ainsi des émissions aurorales atmosphériques observées de l'infrarouge (IR) à l'ultraviolet (UV) au pied des lignes de champ magnétique "actives". Au-dessus de l'atmosphère, ces mêmes électrons sont également à l'origine d'émissions radio basse fréquence, produites par un mécanisme de résonance cyclotron (décrit plus loin). Les émissions aurorales forment donc un diagnostic unique des processus d'accélération des magnétosphères. Dans le cas de Saturne et Jupiter, on distingue trois catégories d'émissions : l'ovale principal, des émissions polaires et des émissions induites par les satellites naturels. Ce stage porte sur l'étude de cette dernière catégorie, dans le cas de Saturne.

En effet, jusqu'en 2011, le seul exemple connu d'interaction planète-satellite générant des émissions aurorales se restreignait à Jupiter et ses satellites galiléens (Io, Ganymède, Europe et Callisto). La figure 2a montre une image des aurores de Jupiter prise par le télescope spatial Hubble dans l'UV. On y distingue l'ovale principal, des émissions polaires ainsi que des taches brillantes brillantes au pied des lignes de champ associées aux satellites. La figure 2b est une carte d'intensité des émissions radio de Jupiter en fonction du temps et de la fréquence (ou spectre dynamique) construite à partir des mesures radio de la sonde Wind (pour les fréquences inférieures à 15 MHz) et du réseau décimétrique de Nançay (pour les fréquences supérieures à 10MHz). Une imagerie radio nécessite des installations trop importantes pour avoir une bonne résolution angulaire (sur Terre comme dans l'espace), c'est pourquoi on fait des cartes d'intensité du signal radio. La figure 2b montre les émissions liées à Io, structurées en forme d'arcs. L'interaction entre Io et Jupiter a été bien étudiée, et le mécanisme supposé d'accélération des électrons est relié à la déformation des lignes de champ par le satellite lors de son déplacement dans la magnétosphère.

Emissions radio aurorales de Saturne

En 2011, une interaction similaire a été découverte entre Saturne et l'un de ses satellites : Encelade [8], une lune qui présente une activité cryovolcanique et dont la période de révolution est de 1,37 jour (la période de rotation de Saturne étant de 11 heures environ). La photo de la figure 2c prise par la caméra UV de Cassini, une sonde en orbite autour de Saturne depuis 2004, montre une tache de faible intensité au pied du tube de flux lié à Encelade, à plus basse latitude que l'ovale principal. Cette signature n'a été détectée que trois fois en sept ans d'observations. Cela montre que, contrairement à Io qui génère des émissions intenses et visibles

en permanence, le cas de l'interaction entre Encelade et Saturne, avec une émission faible et sporadique, est très particulier. Le but du stage est de savoir si ce satellite induit aussi, comme Io, des émissions radio aurorales.

C'est sur les observations radio de l'instrument RPWS (Radio and Plasma Wave Science), embarqué sur la sonde Cassini, que j'ai travaillé. Cet instrument comporte un récepteur haute fréquence, construit au LESIA, qui mesure les émissions de Saturne dans la gamme 3.5 kHz à 16.25 MHz, et qui en détermine le flux ainsi que la polarisation. Ces observations forment une base de donnée unique pour s'intéresser à ce problème. La figure 2d montre un exemple de spectre dynamique, mesuré par RPWS, sur une durée d'une journée. L'émission intense observée entre 30 kHz et environ 1000 kHz est le rayonnement kilométrique kronien (SKR ou Saturn Kilométric Radiation). Connue depuis les sondes Voyager, son spectre s'étend de 3kHz à 1.2 MHz, avec un pic d'intensité entre 100 et 400 kHz. Il est polarisé circulairement avec une polarisation droite dans l'hémisphère Nord et gauche dans l'hémisphère Sud. Ce rayonnement est produit sur les lignes de champ magnétique connectées à l'ovale principal UV [4]. Il contient de nombreuses structures en forme d'arc, comme on peut le voir sur la figure 2d. On cherche à savoir si certaines d'entre elles sont induites par Encelade.

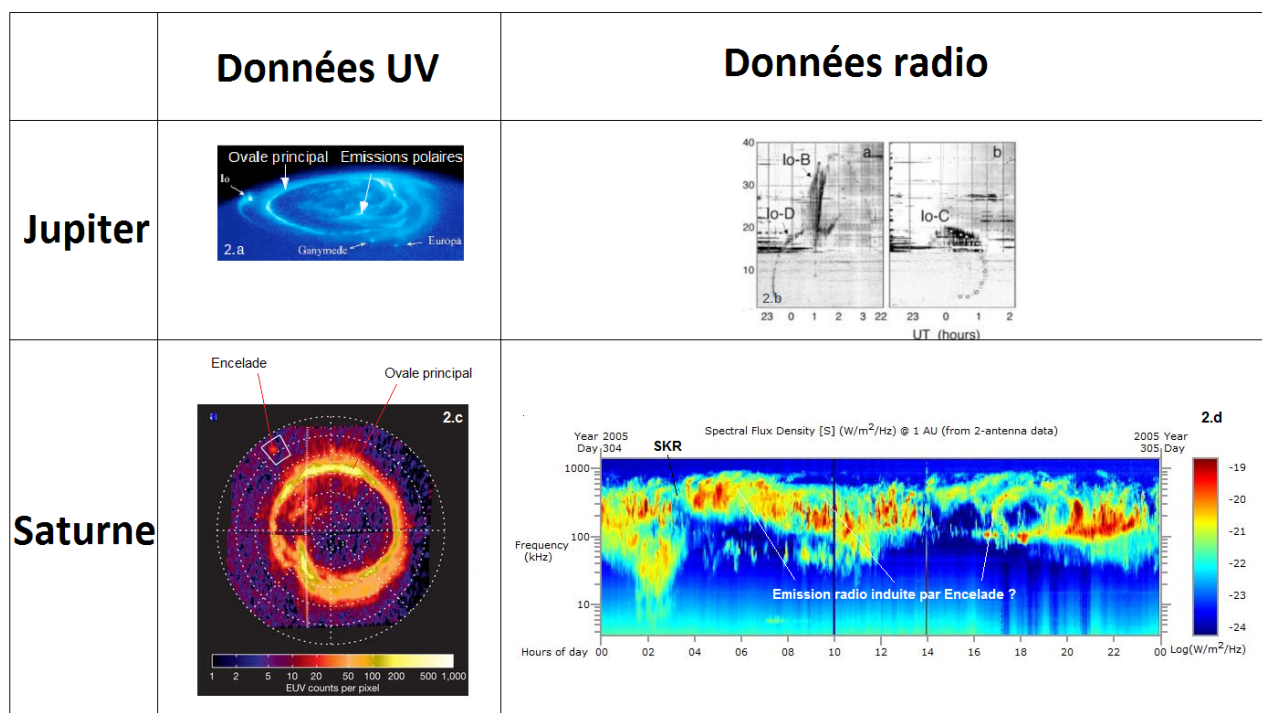


FIGURE 2 – La figure 2a est une image de Jupiter prise dans l'UV par le télescope spatial Hubble. On y voit l'ovale principal, des émissions polaires, ainsi que des taches brillantes correspondant aux pieds des tubes de flux magnétique connectés aux satellites Io, Ganymède et Europe. La figure 2b est une carte d'intensité des émissions radio de Jupiter en fonction du temps et de la fréquence, construite à partir des mesures de la sonde Wind (pour les fréquences inférieures à 15MHz) et du réseau décamétrique de Nançay (pour les fréquences supérieures à 10MHz). Elle montre les émissions radio aurorales liées à Io, avec une structure en forme d'arcs. La figure 2c est une photo de Saturne, prise par la camera UV de Cassini. On y retrouve l'ovale principal auroral ainsi qu'une tache faible à plus basse latitude, correspondant à Encelade. La figure 2d montre un spectre dynamique des émissions radio de Saturne observées par Cassini sur une journée. L'émission observée montre des structures en forme d'arc, entre 30 kHz et 1000 kHz : c'est le SKR.

Méthodologie

Pour effectuer mes recherches, j'ai successivement :

- cherché et utilisé des modèles de densité et de champ magnétique de Saturne afin de calculer le spectre théorique de l'émission attendue pour Encelade (partie 1) ;
- utilisé un code de simulation des émissions radio planétaires pour simuler le spectre dynamique des émissions induites par Encelade attendues pour la position de Cassini, de 2004 à 2011 (partie 2) ;
- comparé ces simulations aux observations Cassini lors de périodes propices, d'abord au cas par cas puis de façon statistique (partie 3).

1 Spectre des émissions liées à Encelade

Mécanisme d'émission radio

De façon analogue avec les émissions radio aurorales terrestre et jovienne, le mécanisme d'émission du rayonnement kilométrique kronien est l'Instabilité Maser Cyclotron. Il correspond à une interaction résonante électron-onde qui permet de transférer de l'énergie des électrons auroraux aux ondes électromagnétique à une fréquence égale à la fréquence cyclotron locale. Cette interaction ne peut avoir lieu que lorsque deux conditions sont réunies :

- La fréquence du plasma ambiant (f_{pe}) doit être très inférieure à la fréquence cyclotron (f_{ce}) des électrons. Le rapport f_{pe}/f_{ce} doit typiquement être inférieur à 0,1 [6].

Le mouvement des électrons, provoqué par la force de Lorentz, s'effectue à la fréquence cyclotron : $f_{ce} = \frac{Bq}{2\pi m}$ avec B l'intensité du champ magnétique, q la charge de l'électron, et m la masse de l'électron. La fréquence naturelle de relaxation des électrons dans un plasma, qu'on appelle la fréquence plasma, a pour expression : $f_{pe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$ avec n_e la densité de plasma, e la charge d'un électron, ϵ_0 la perméabilité du vide, m_e la masse d'un électron et $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_0 m_e}}$ une constante environ égale à 9 pour f_{pe} calculée en kHz et n_e en cm^{-3} .

- Ces électrons doivent avoir être accélérés et avoir une distribution de vitesse hors équilibre.

Dans la suite de cette étude, on fait l'hypothèse que les électrons présents dans le tube de flux lié à Encelade vérifient cette seconde condition. Afin d'identifier la position, sur la ligne de champ, et donc le spectre d'émission des sources produisant les ondes radio, on va modéliser la densité et le champ magnétique dans la magnétosphère de Saturne.

Modèle de densité

La magnétosphère de Saturne est alimentée par deux sources de plasma principales : son ionosphère et le tore d'Encelade. J'ai d'abord modélisé la densité de l'ionosphère, notée n_1 , qui suit une loi exponentielle [2] :

$$n_1(r) = n_{01} \exp(-(r - Rs)/h1) \quad (1)$$

Avec $n_{01} = 2,4 \cdot 10^4 cm^{-3}$, r la distance radiale au centre du Saturne, $Rs = 60268 km$ le rayon de Saturne et $h1$ la hauteur caractéristique, inférieure à 0.02 Rs .

Pour le modèle de densité du tore de plasma généré par Encelade, j'ai utilisé les mesures in

situ de pression et température de la sonde Cassini [1]. La pression étant donnée en nPa et la température donnée en eV, on obtient la formule suivante pour la densité en cm^{-3} :

$$n_1(r, \theta) = \frac{P}{T} 10^{-4} \quad (2)$$

avec θ la latitude. J'ai vérifié la pertinence de ce modèle en le comparant à un autre modèle plus ancien [7].

Modèle de champ magnétique

En première approximation, on peut modéliser le champ magnétique de Saturne par un dipôle magnétique. C'est tout d'abord ce que j'ai utilisé pour me familiariser avec le calcul en tout point de la magnétosphère de l'intensité du champ magnétique. De façon plus réaliste, j'ai utilisé le modèle Saturn Pioneer Voyager (SPV), réalisé grâce aux mesures in situ des sondes Pioneer et Voyager, et qui s'apparente à un dipôle aligné avec l'axe de rotation et décalé de 4% vers le Nord (N. Achilleos, communication personnelle).

Spectre d'émission

J'ai calculé numériquement le rapport f_{pe}/f_{ce} le long de la ligne de champ magnétique liée à Encelade. Il est tracé sur la figure 3a en fonction de f_{ce} (en noir pour l'hémisphère Nord, en rouge pour le Sud). On observe que la limite haute fréquence est plus grande au Nord car l'intensité du champ magnétique est plus importante qu'au Sud, pour une même altitude. En faisant figurer sur le graphe la condition $f_{pe}/f_{ce} < 0.1$, on obtient directement le spectre d'émission. Sur la figure 3b, j'ai représenté Saturne et ses anneaux en vue méridienne, la ligne de champ considérée, le modèle de densité de Cassini ainsi que la position des sources émettrices (en gras).

J'ai appliqué un calcul similaire pour d'autres lignes de champ : celle associée à Rhéa, une autre lune de Saturne, qui pourrait aussi être active, à l'ovale auroral principal afin de vérifier le spectre théorique d'émission du SKR, ainsi qu'à l'ovale secondaire, plus faible et à plus basse latitude, récemment identifié en UV [3] et qui pourrait, comme l'ovale principal, avoir une contrepartie radio. Les graphes correspondant sont présentés dans la figure 10 en annexe. Les spectres trouvés sont résumés dans le tableau ci-après.

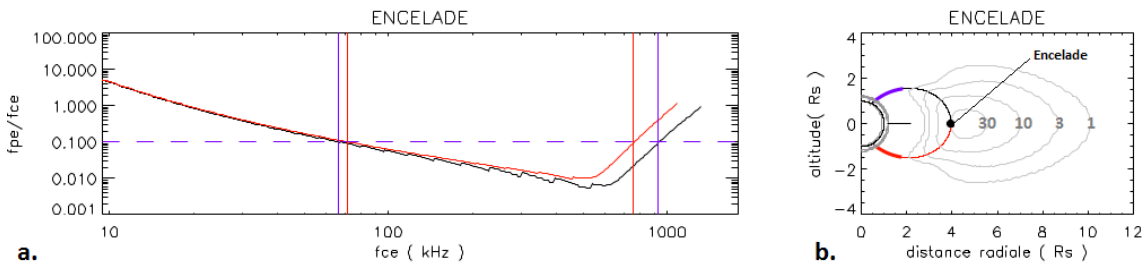


FIGURE 3 – La figure 3a montre l'évolution du rapport f_{pe}/f_{ce} en fonction de f_{ce} pour la ligne de champ liée à Encelade, modélisée figure 3b. L'IMC peut avoir lieu si ce rapport est inférieur à 0.1, on a mis en évidence sur les graphes figure 3a les limites en fréquence f_{ce} . La figure 3b montre la modélisation des sources émettrices en gras, dont le spectre est représenté par les lignes verticales figure 3a, ainsi que Saturne, ses anneaux et le modèle de densité Cassini dont les contours sont donnés en cm^{-3}

Spectre théorique de l'émission radio associée à différentes lignes de champ

Ligne de champ	$F_{min}(kHz)$		$F_{max}(kHz)$	
	Nord	Sud	Nord	Sud
Encelade	65	75	950	750
Rhea	25	35	1000	850
Ovale principal (SKR)	20	25	1000	850
Ovale secondaire	45	55	950	800

2 Modélisation des arcs

Code de simulation utilisé et forme d'arc

Les émissions radio, fortement anisotropes, sont émises dans un cône d'émission avec un grand angle par rapport au champ magnétique et dont l'épaisseur fait quelques degrés. La visibilité de l'émission dépend donc de trois paramètres : la position de la source radio, son angle d'émission et la position de l'observateur. Elle a été simulée récemment avec un code de simulation d'émissions radio planétaires que j'ai réutilisé par la suite [5]. Depuis l'étude de la modélisation du SKR, on sait que la signature d'une ligne de champ active qui passe (en tournant avec la planète) dans le champ de vue d'un observateur fixe correspond à un arc dans le spectre dynamique observé. Cette forme est due à un effet de géométrie de l'observation et à l'anisotropie de l'émission (voir fig. 11 en Annexe).

Modélisation

J'ai utilisé le code mentionné plus haut pour simuler les émissions pour Encelade, en flux et en polarisation, dans le plan temps fréquence depuis le début de la mission. J'ai choisi comme observateur Cassini, et j'ai défini les sources radio sur la ligne de champ magnétique liée à Encelade dont la position a été calculée précédemment. Le paramètre libre de cette simulation est l'angle θ d'émission des sources. On considère deux modèles d'angle d'émission : un modèle d'angle constant, et un modèle plus réaliste qui dépend de la fréquence [5].

Pour me familiariser avec ce code, j'ai au préalable recalculé des modèles d'arcs simulés pour le SKR par L. Lamy et al. ainsi que les éphémérides d'Encelade et Cassini¹.

J'ai réalisé les simulations sur trois jours afin d'avoir au moins deux arcs simulés. Les figures 4a et 4b montrent un exemple de spectres dynamiques simulés de flux et de polarisation. L'arc modélisé avec un angle d'émission réaliste est "encadré" par les deux autres. Ces simulations se comparent avec les observations de Cassini obtenues sur la même période des figures 4c et 4d.

3 Analyse des observations Cassini

3.1 Etude au cas par cas

Pour comparer les simulations aux observations, j'ai d'abord cherché des périodes propices durant lesquelles l'intensité du SKR (susceptible de masquer les émissions attendues pour Encelade) est faible. On sait que les sources du SKR émettent un rayonnement plus intense du côté matin de la planète. J'ai, d'autre part, restreint l'étude aux périodes où la sonde Cassini

1. <http://www-pw.physics.uiowa.edu/~jbg/cas.html>

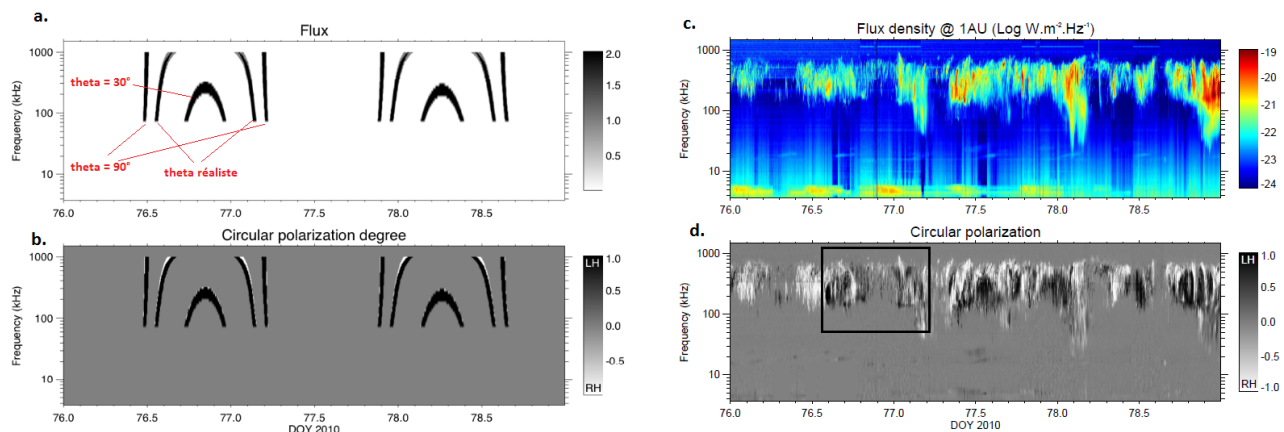


FIGURE 4 – Les figures 4a et 4b sont un exemple de spectres dynamiques simulés de flux et de polarisation pour les jours 70 à 76 de l’année 2010. L’arc modélisé avec un angle d’émission réaliste est ”encadré” par les deux autres. Ces simulations se comparent aux observations Cassini des figures 4c et 4d. On voit sur cette dernière la possible présence d’une signature radio d’Encelade.

avait une position stable aux basses latitudes, de façon à ce que le choix de l’angle d’émission influence peu la forme de l’arc. Ces deux conditions m’ont permis d’identifier trois intervalles :

- jour 2004-181 $\Rightarrow$ jour 2005-100
- jour 2005-250 $\Rightarrow$ jour 2006-173
- jour 2009-265 $\Rightarrow$ jour 2011-365

J’ai ensuite identifié visuellement dans ces observations les arcs compatibles avec mes simulations. J’en ai identifié une quarantaine. Cependant la persistance de l’émission du SKR, même durant ces périodes, et l’adéquation approximative entre les arcs identifiés et simulés, empêchent d’avoir une identification positive à ce stade.

3.2 Etude spectrale

Spectre moyen

Pour pallier le problème précédent, j'ai réalisé une étude statistiques des spectres dynamiques de flux observés et simulés. En effet lorsqu'on trace ces derniers en fonction de la différence de temps local entre le satellite et la sonde, on met en évidence un arc moyen (fig. 6a). J'ai calculé le spectre moyen des observations correspondantes (fig. 6b) dans le but d'y chercher une structure similaire. Cependant, sur ce dernier, l'émission est distribuée régulièrement et on n'y observe aucune structure remarquable, ce qui suggère qu'il s'agit seulement du SKR.

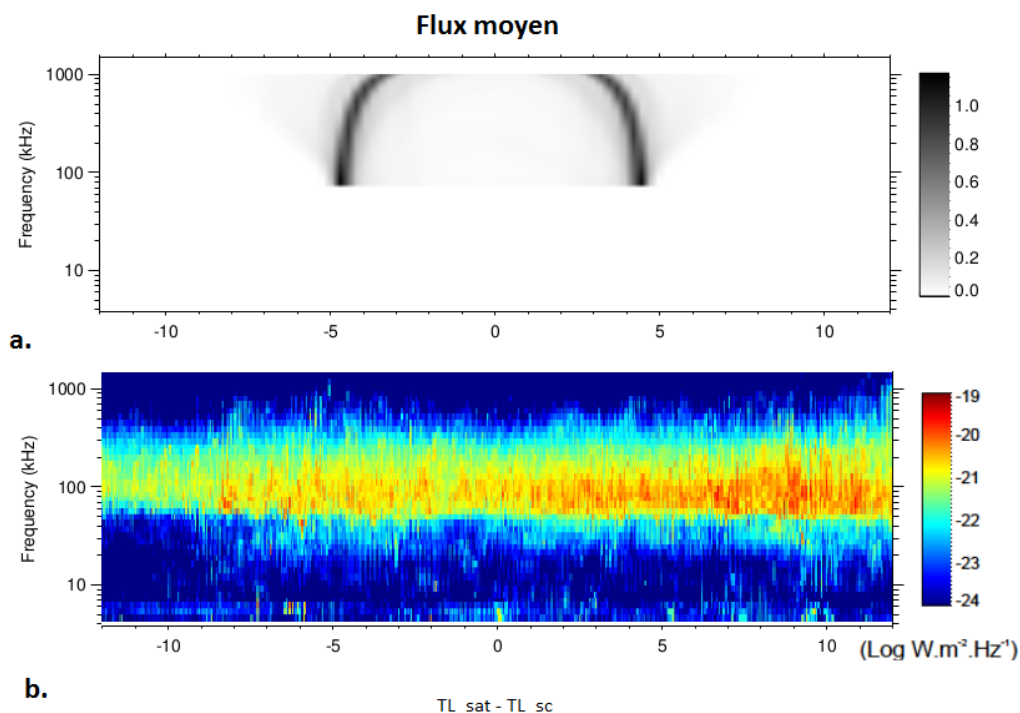


FIGURE 5 – La figure 6a montre l'arc moyen formé par les simulations depuis le début de la mission Cassini. La figure 6b est le spectre moyen des observations correspondantes. Les spectres sont tracés en fonction de la différence de temps local entre Encelade et et la sonde.

Transformée de Fourier

J'ai par la suite utilisé une autre technique qui visait à rechercher un signal périodique en étudiant la Transformée de Fourier du signal temporel du spectre de flux. Pour ce faire j'ai fait la somme, pour un temps donné, de la valeur du flux pour une gamme de fréquence allant de 100kHz à 400kHz afin d'obtenir le flux, intégré en fréquence, en fonction du temps. Cette opération a été effectuée sur des durées de 1 an, et j'y ai cherché toute périodicité se rapprochant d'Encelade ou d'un autre des satellites naturels. La figure 8 montre la densité spectrale de puissance de la Transformée de Fourier du signal en fonction de la période, en jours, pour les hémisphères Nord et Sud. On obtient bien un pic pour une période d'environ 10h (période de rotation de Saturne). On ne voit aucune périodicité correspondant à celle des différents satellites naturels. Ceci suggère le caractère sporadique et instable de l'émission recherchée.

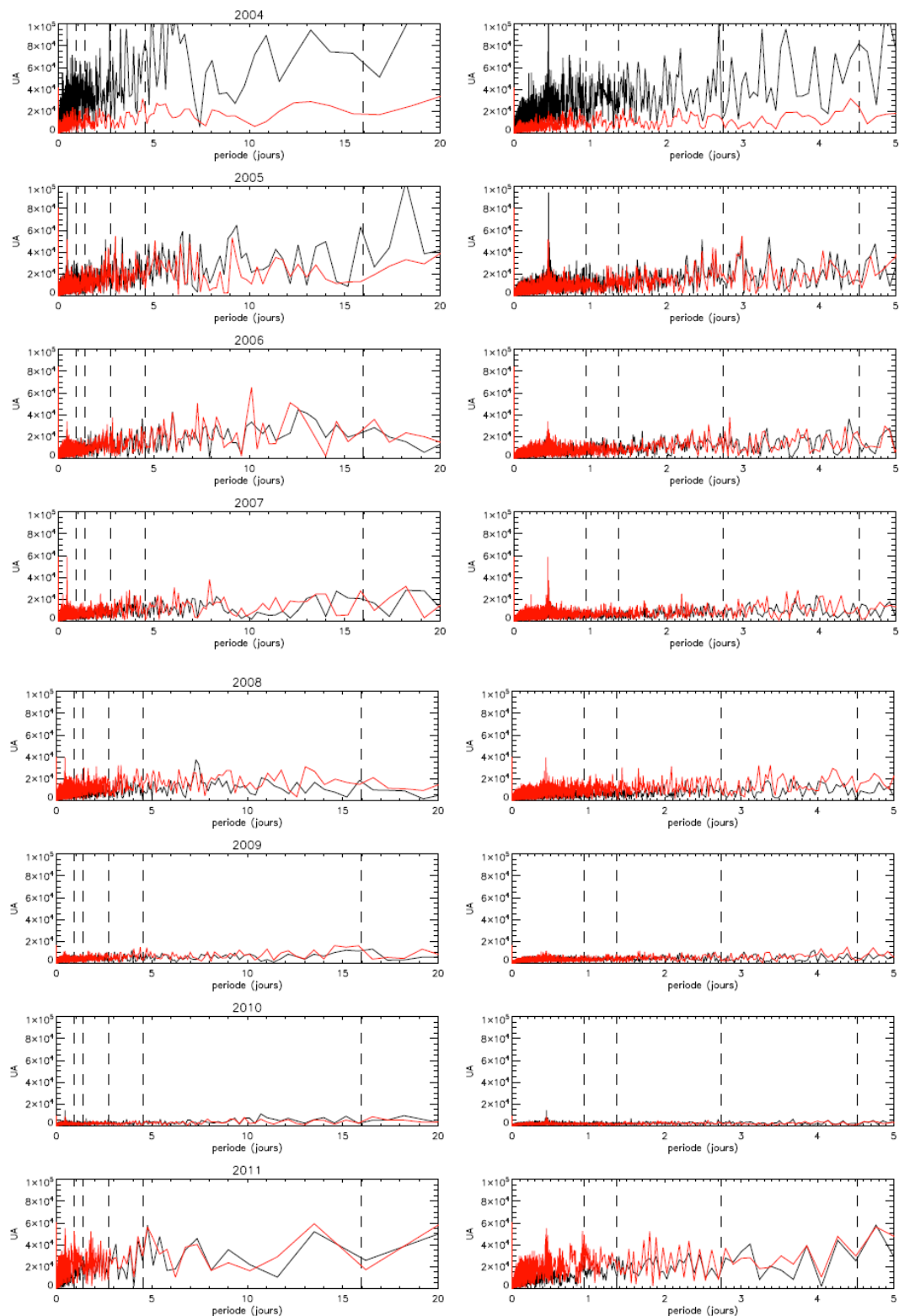


FIGURE 6 – La densité spectrale de puissance calculée en fonction de la période en jours au cours de la mission nous montre le pic du aux émissions principales pour une période de 10h environ pour les hémisphères nord (Rouge) et sud (Noir). On a en pointillé les périodes d'autres satellites naturels, dans cet ordre : Mimas, Encelade, Dioné, Rhéa et Titan. On ne voit pas d'autres structures se dégager du bruit.

4 Localisation des sources

En complément, et pour avoir une approche différente des autres études, j'ai utilisé une spécificité du récepteur RPWS qui lui permet de localiser les sources d'émission du signal reçu. Je disposais d'une base de fichiers contenant : - les spectres dynamiques en flux et en polarisation observés par Cassini (figure 7a) - une représentation de la position des sources dans le plan de vue de Cassini (figure 7b) - Une projection magnétique polaire de ces sources (figure 7c)

J'ai cherché dans cette base de données si on pouvait noter une concentration de points au pied de la ligne de champ d'Encelade et le long de sa ligne de champ magnétique. Parmi quatre candidats, je vais présenter le plus intéressant : le jour 2009207 (voir figure 7). On observe sur la figure une concentration de points au pied de la ligne de champ d'Encelade, et également aux latitudes de l'ovale principal. Elles y restent localisées lors de la rotation de Saturne. En regardant le spectre dynamique de flux (figure 8a), on peut distinguer un arc potentiellement associé à ces émissions. La comparaison avec le modèle de simulation, que je n'avais étudié qu'aux basses latitudes jusque là, nous montre également que cette signature se situe dans la zone de visibilité attendue. Ce serait donc le cas le plus probable de signature radio induite par Encelade.

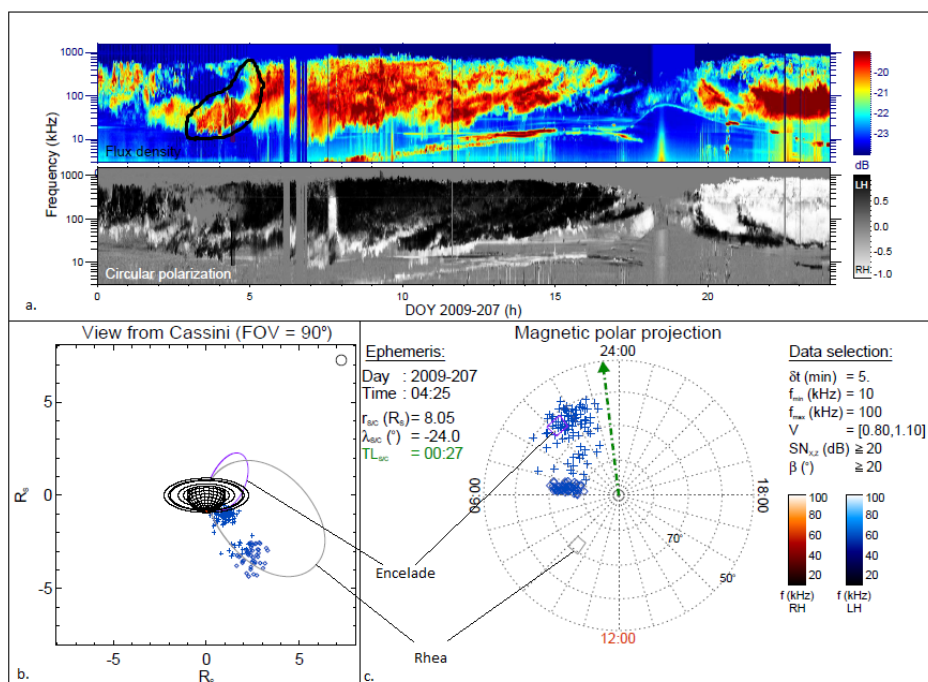


FIGURE 7 – La figure 5a nous montre les spectres dynamiques en flux et en polarisation. gure 5b on voit Saturne, la position des sources d'émissions ainsi que les lignes de champ d'Encelade et Rhéa dans le plan de vue de Cassini. Enfin, on a sur la figure 5c. une vue polaire de Saturne avec la position, matérialisée par une boîte, des pieds des lignes de champ liées à Rhéa et Encelade. On peut y voir également les pieds des lignes de champ active dans les hémisphères nord (en rouge) et sud (en bleu).

5 Recherche de traversée des sources

Enfin, une ultime approche indépendante des autres a consisté à rechercher les dates durant lesquelles Cassini a traversé le tube de flux magnétique lié à Encelade, dans le but de voir si la fréquence alors observée correspondait à la fréquence cyclotron locale. En sélectionnant

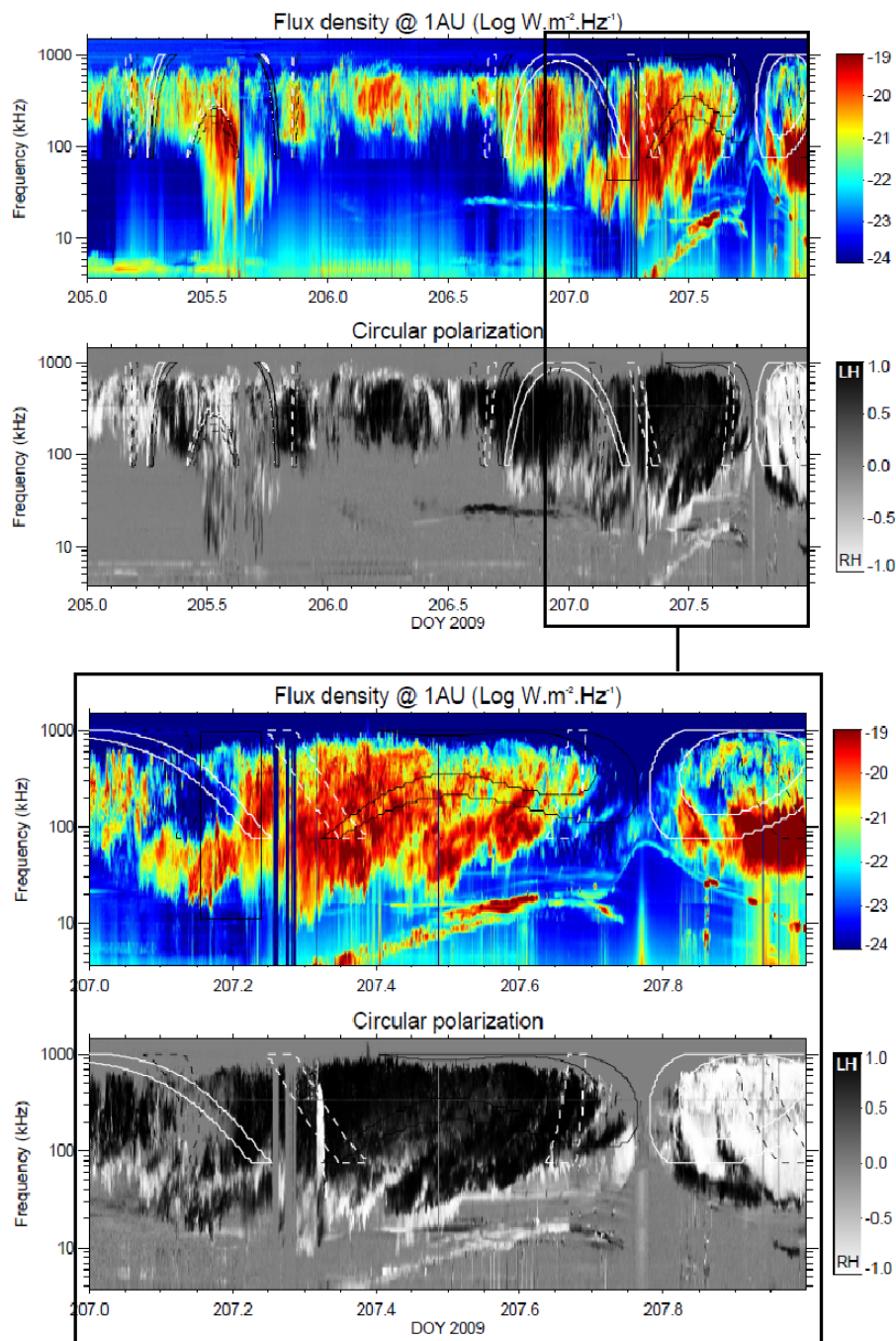


FIGURE 8 – Sur cette figure on a les spectres dynamiques observés par Cassini superposés avec les simulations des signatures radio induites par Encelade pour 3 jours, et un zoom sur le jour qui nous intéresse. On peut voir un encadrement de la signature identifiée polarisée LH, et on voit qu'elle se trouve dans la zone de visibilité, entre l'arc simulé pour un angle de 30 degrés (en pointillé), et l'arc simulé pour un angle d'émission qui varie en fonction de la fréquence.

ces intervalles de temps par l'analyse des éphémérides de Cassin, j'ai trouvé 25 dates et ai utilisé un outil de tracé des observations RPWS (en ligne) qui permet de visualiser le spectre dynamique de flux observé par la sonde avec le tracé de la valeur de la fréquence cyclotron locale. Il suffisait donc de voir si la courbe de f_{ce} interceptait l'émission du SKR. Ca n'a pas

été le cas pour les dates étudiées. Ceci montre que la sonde n'a pas traversé la zone du tube de flux contenant les sources radio liées à Encelade.

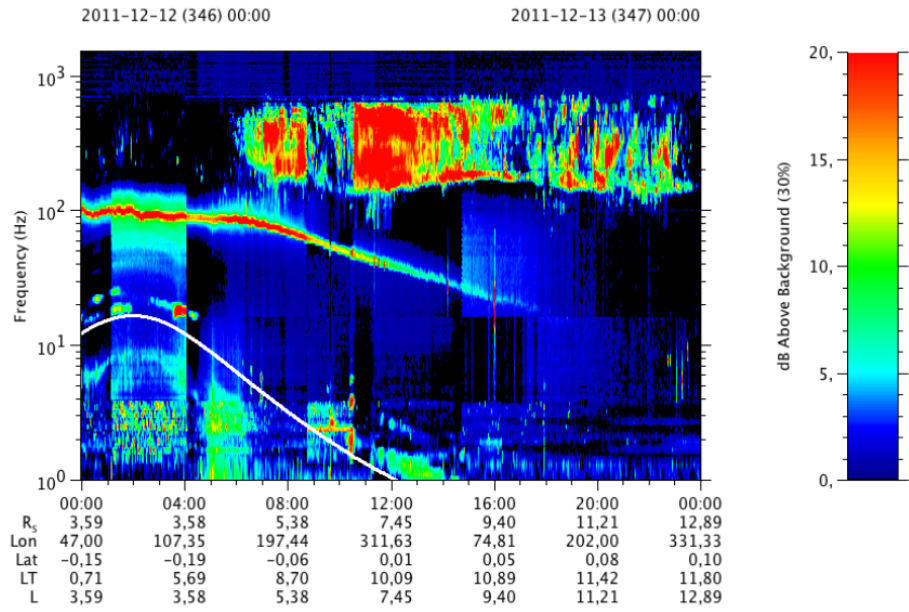


FIGURE 9 – On peut voir sur cette figure le spectre dynamique relevé durant une journée sur lequel on a superposé la valeur de la fréquence cyclotron locale. Sur cet exemple il est clair que l'émission du SKR ne recoupe pas la courbe de f_{ce} .

6 Conclusion et perspectives

J'ai eu, au cours de ce stage, différentes approches diverses et variées pour tenter de répondre à la problématique posée. L'étude statistique ne m'a pas permis d'avoir une identification positive de signature d'Encelade. Ce résultat est probablement dû au caractère faible et sporadique des émissions aurorales le long de la ligne de champ liée à Encelade.

Le caractère approximatif des arcs identifiés au cas par cas ne me permet pas non plus d'avoir un résultat positif solide. L'étude de la position des sources m'a donné une signature possible qu'il faut étudier plus précisément, notamment en essayant de regarder les images UV prises par Cassini ce jour-là.

La preuve de l'existence d'une signature radio induite par Encelade nous permettra dans un second temps d'avoir des informations sur les mécanismes d'accélération d'électrons dans la magnétosphère de Saturne, et de faire de la planétologie comparée avec Jupiter. Plus généralement, ces recherches nous permettent de mieux comprendre les processus physiques d'accélération et d'émission à l'oeuvre dans les magnétosphères planétaires.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Laurent Lamy pour la confiance qu'il a placé en moi, l'aide qu'il m'a apporté durant ces premiers mois de stage, ainsi que sa patience. Je voudrais aussi remercier Carine Briand, Baptiste Cecconi, Anne-Lise Gautier, Julien Girard et Philippe Zarka pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et leur aide technique.

La bonne humeur qu'ils ont su me communiquer durant ce stage m'a beaucoup aidé dans mon travail et j'ai pu vivre grâce à eux une expérience enrichissante

Références

- [1] L. Davis, Jr. and E. J. Smith. A model of Saturn’s magnetic field based on all available data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 95 :15257–15261, September 1990.
- [2] P. Galopeau, P. Zarka, and D. Le Queau. Theoretical model of Saturn’s kilometric radiation spectrum. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 94 :8739–8755, July 1989.
- [3] D. Grodent, A. Radioti, B. Bonfond, and J.-C. Gérard. On the origin of Saturn’s outer auroral emission. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 115 :8219, August 2010.
- [4] L. Lamy, B. Cecconi, R. Prangé, P. Zarka, J. D. Nichols, and J. T. Clarke. An auroral oval at the footprint of Saturn’s kilometric radio sources, colocated with the UV aurorae. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 114 :10212, October 2009.
- [5] L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, S. Hess, and R. Prangé. Modeling of Saturn kilometric radiation arcs and equatorial shadow zone. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 113 :10213, October 2008.
- [6] P. Louarn. Auroral planetary radio emissions - Theoretical aspects. *Advances in Space Research*, 12 :121–134, August 1992.
- [7] A. M. Persoon, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, and J. B. Groene. A simple scale height model of the electron density in Saturn’s plasma disk. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 33 :18106, September 2006.
- [8] W. R. Pryor, A. M. Rymer, D. G. Mitchell, T. W. Hill, D. T. Young, J. Saur, G. H. Jones, S. Jacobsen, S. W. H. Cowley, B. H. Mauk, A. J. Coates, J. Gustin, D. Grodent, J.-C. Gérard, L. Lamy, J. D. Nichols, S. M. Krimigis, L. W. Esposito, M. K. Dougherty, A. J. Jouchoux, A. I. F. Stewart, W. E. McClintock, G. M. Holsclaw, J. M. Ajello, J. E. Colwell, A. R. Hendrix, F. J. Crary, J. T. Clarke, and X. Zhou. The auroral footprint of Enceladus on Saturn. *Nature*, 472 :331–333, April 2011.

ANNEXES

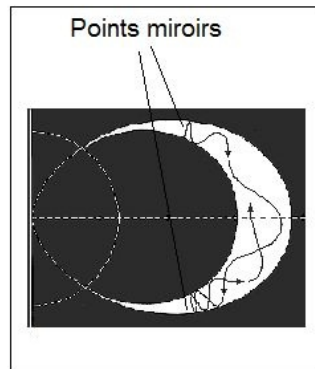


FIGURE 10 – :On montre la circulation des électrons dans un tube de flux magnétique ainsi que les points miroirs entre lesquels ils sont piégés.

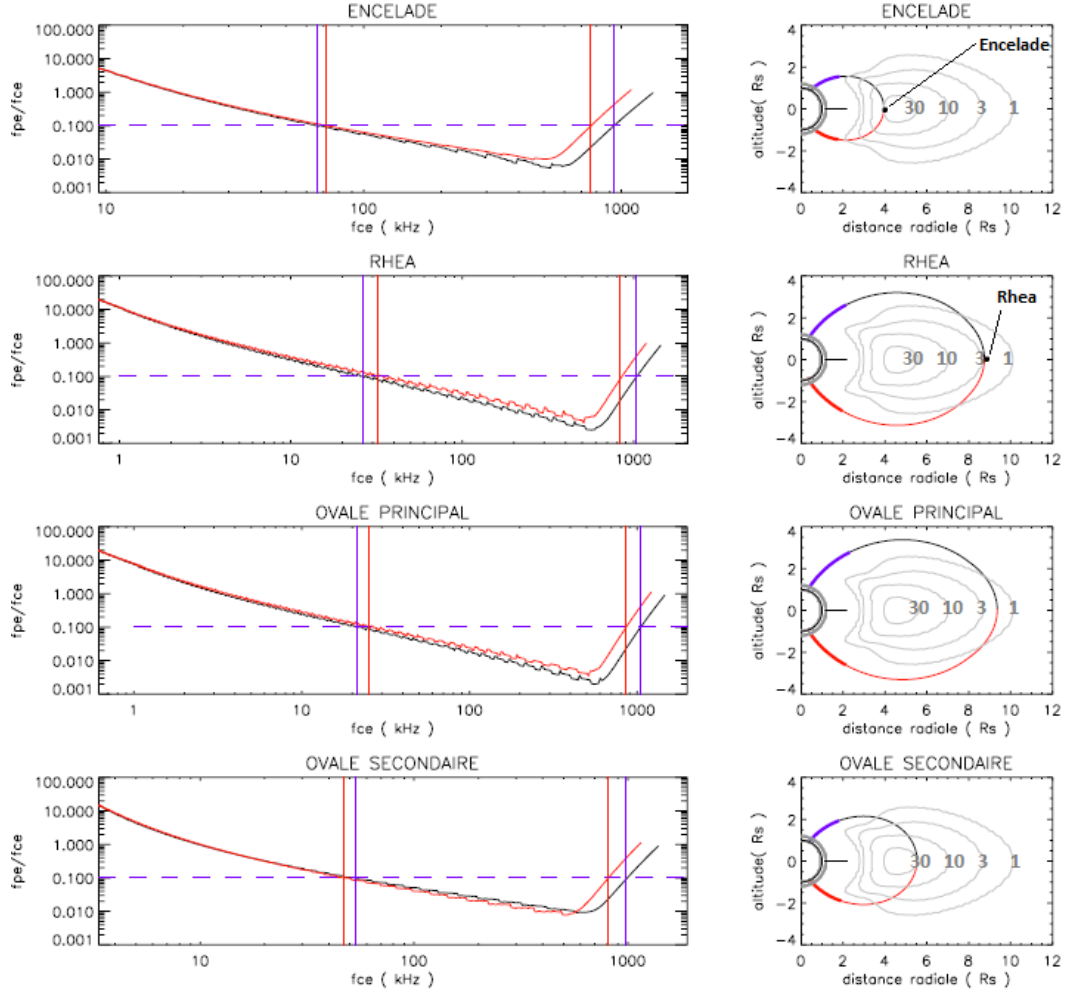


FIGURE 11 – Ici la figure montre les résultats du calcul du spectre d'émission pour les différentes lignes de champ. La colonne de gauche nous montre l'évolution du rapport f_{pe}/f_{ce} en fonction de f_{ce} pour différentes lignes de champ magnétique modélisées sur la droite. L'IMC ne pouvant avoir lieu seulement si le rapport est inférieur à 0.1, on a mis en évidence sur les graphes de gauche les limites en fréquence f_{ce} , ainsi que la position des sources émettrices, en gras le long des lignes de champ, à droite. Saturne, son anneau principal et le modèle de densité Cassini, dont les contours sont donnés en cm^{-3} , sont également modélisés sur les graphes de la colonne de droite.

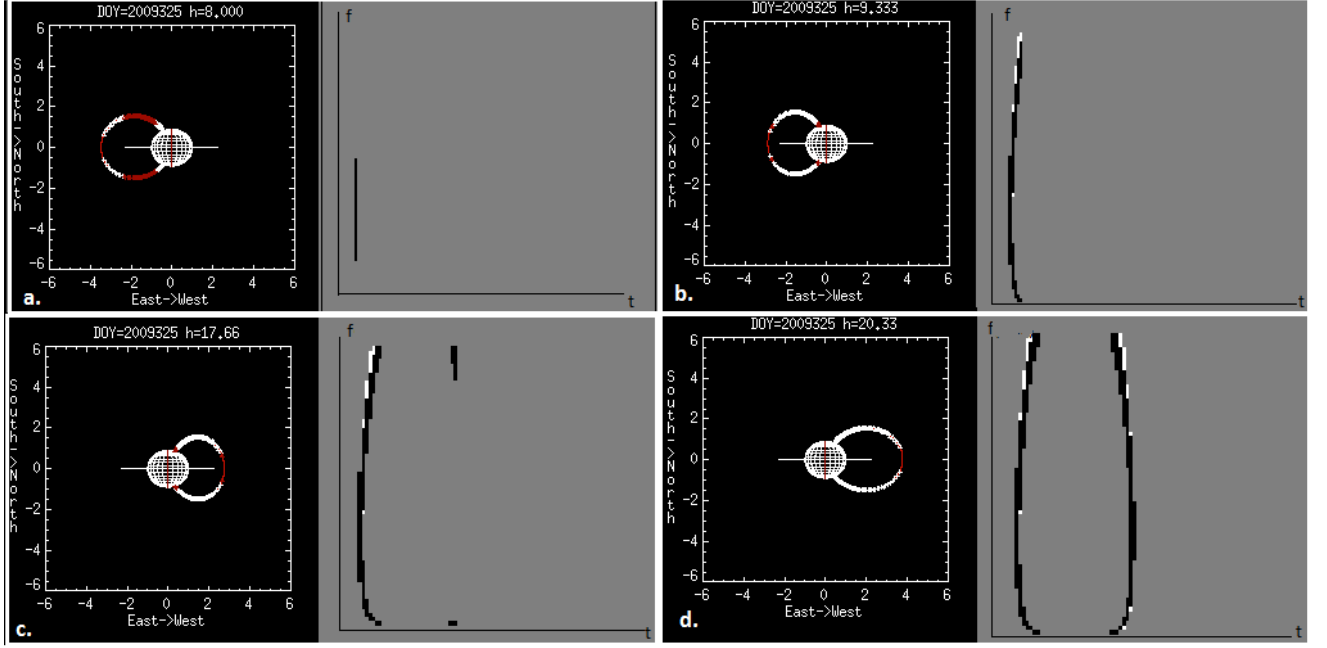


FIGURE 12 – La figure décrit comment se forme un arc lorsqu’une ligne de champ passe dans le champ de vue de l’observateur. C’est une modélisation de Saturne, d’une ligne de champ ainsi que des sources émettrices d’ondes radio (marquées en rouge le long de la ligne de champ). Le spectre dynamique calculé par l’observateur figure à droite, entre 10 et 1000 kHz. Cette structure en forme d’arc est due à un effet de géométrie : lorsque l’observateur se situe à basse latitude et que la ligne de champ passe dans son champ de vue, il va d’abord recevoir le signal des sources émettant à basse fréquence. Puis, au fur et à mesure que la ligne de champ tourne, il va recevoir les signaux des sources à plus hautes fréquences. Par symétrie on obtient une forme d’arc dont l’épaisseur dépend de l’angle d’émission de ces sources.