



Etude des émissions naturelles dans la plasmasphère, reliées à la gyrofréquence électronique, à l'aide de données de la mission multi satellite CLUSTER

Farida El-Lemdani Mazouz

► To cite this version:

Farida El-Lemdani Mazouz. Etude des émissions naturelles dans la plasmasphère, reliées à la gyrofréquence électronique, à l'aide de données de la mission multi satellite CLUSTER. Physique [physics]. Université d'Orléans, 2008. Français. NNT : . tel-00340250

HAL Id: tel-00340250

<https://theses.hal.science/tel-00340250>

Submitted on 20 Nov 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
LABORATOIRE LPCE

THÈSE présentée par :

Farida EL-LEMDANI MAZOUZ

soutenue le : **30 Juin 2008**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Physique des plasmas

Étude des émissions naturelles dans la plasmasphère, reliées à la gyrofréquence électronique, à l'aide des données de la mission multi-satellites CLUSTER

THÈSE dirigée par :

M Jean Gabriel TROTIGNON Chargé de recherche, LPCE, Orléans

RAPPORTEURS :

M Ondrej SANTOLIK Professeur associé, Université Charles Prague
M Christian MAZELLE Chargé de recherche, CESR, Toulouse

JURY :

M Jean Louis ROUET	Professeur, Université d'Orléans
M Jean Gabriel TROTIGNON	Chargé de recherche, LPCE, Orléans
M Hervé DE FERAUDY	Professeur, Université de Versailles
M François LEFEUVRE	Directeur de Recherche, LPCE, Orléans
M Ondrej SANTOLIK	Professeur associé, Université Charles Prague
M Christian MAZELLE	Chargé de recherche, CESR, Toulouse

**Etude des émissions naturelles dans la
plasmasphère, reliées à la gyrofréquence
électronique, à l'aide de données de la
mission multi-satellites CLUSTER**

*Study of the natural emissions in the plasmasphere,
related to the electron gyrofrequency using CLUSTER
multi satellites data*

Farida EL-LEMDANI MAZOUZ

Résumé

Cette thèse rassemble une série de travaux sur les émissions naturelles observées dans la partie externe de la plasmasphère terrestre par la mission multi-satellites CLUSTER, et plus précisément par l'instrument WHISPER. Parmi les émissions observées, citons les ondes électrostatiques électroniques observées entre deux gyrofréquences électroniques successives. Ces ondes sont couramment appelées $(n+1/2)f_{ce}$ et sont aussi bien observées dans la magnétosphère terrestre que dans celles d'autres planètes magnétisées. Nous proposons une classification de toutes les émissions naturelles observées dans la plasmasphère, basée sur les caractéristiques spectrales déterminées lors d'études d'événements. Nous nous intéresserons ensuite aux les trois types principaux d'ondes rencontrées : émissions aux $n(1.1)f_{ce}$, aux $(n+1/2)f_{ce}$ et aux nf_{ce} . Ces dernières, mises en évidence grâce à la bonne résolution de l'instrument WHISPER, n'avaient jamais été observées auparavant. Une étude systématique sur trois années de données (la période 2002-2004) a permis de localiser les différentes émissions observées en secteur MLT et en latitude magnétique. Par des études d'événements multi-satellites, et par l'étude statistique, nous avons pu mettre en évidence l'importance de la distance radiale à la plasmopause sur les caractéristiques (intensité, nombre d'harmoniques présentes) des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées. Pour quantifier cette distance à la plasmopause, nous avons défini un indicateur utilisant la valeur de la fréquence plasma, mesurée par l'instrument WHISPER, lors de la traversée de l'équateur magnétique. Nous avons aussi étudié l'influence de l'activité géomagnétique, à travers les variations des indices AE, Kp et Dst, sur les trois types d'ondes étudiés. En examinant les données de l'instrument PEACE de la missions CLUSTER, deux formes différentes de la fonction de distribution, dépendant de l'intensité des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, ont été mises en évidence. Enfin, nous nous sommes familiarisés avec l'utilisation d'un code particulière et avons retrouvé les modes propres du plasma prédits par la théorie linéaire.

Abstract

This dissertation gathers a series of investigations about natural emissions observed in the external part of the plasmasphere by CLUSTER multi satellite mission and more precisely by WHISPER instrument. Among the observed emissions, we can quote the electrostatic electron cyclotron harmonics, observed between two successive electron gyrofrequency. These waves are usually called $(n+1/2)f_{ce}$ emissions, they are observed in Earth's magnetosphere as well as in the vicinity of other planets. We propose a classification of the natural emissions observed in the plasmasphere, based on spectral characteristics. We focus on three principal types of waves: emissions at $n(1.1)f_{ce}$, at $(n+1/2)f_{ce}$, and at nf_{ce} . The last ones have been highlighted thanks to the good resolution of WHISPER instrument, they had never been observed before. A systematic study over three years of data (2002-2004) permit the localisation of the different emissions observed in MLT sector, and with magnetic latitude. Using multi satellite event studies and statistical study, we show the importance of the radial distance to the plasmopause on the characteristics features (intensity, number of harmonics) of the emissions at $(n+1/2)f_{ce}$. To characterize this distance to the plasmopause we define a proxy using the value of the equatorial plasma frequency, f_{p-eq} , measured by WHISPER instrument. We also studied the influence of the geomagnetic activity, through the variations of indices AE, Kp and Dst, on the three types of emissions observed. Some signatures on the electron distribution function have been examined. Two distinct forms of this distribution function, related to the intensity of the emissions at $(n+1/2)f_{ce}$, are observed. Finally, we present preliminary results of numerical simulations using a particle code and we find the eigen modes of the plasma predicted by the linear theory.

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier Pierrette Décréau et Jean Louis Rauch pour m'avoir accordé leur confiance il y a 5 ans maintenant, de m'avoir encouragée à passer par la case DEA tout d'abord et de m'avoir proposé ce sujet de thèse ensuite.

Un grand merci à Pierrette qui a dirigé cette thèse pendant ces années, merci pour ta qualité d'encadrement et d'écoute, merci d'avoir pris de ton temps pour toujours me conseiller, merci pour ton aide et pour ta disponibilité. J'ai beaucoup appris à tes côtés.

Merci également à Jean Louis Rauch, d'avoir co-encadré ce travail, les discussions fructueuses qu'on a pu avoir m'ont permis d'avancer dans l'accomplissement de mon travail, merci d'avoir transmis tes connaissances avec beaucoup de générosité.

Toute ma gratitude va également à Jean Gabriel Trotignon qui a accepté de prendre la charge administrative de la direction de thèse sur la fin, merci surtout de ne pas avoir été là que pour le coté administratif, mais d'avoir aussi, entre autres, aidé à la correction de ce manuscrit.

Cette thèse a été effectuée au Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE), je voudrais donc particulièrement remercier Pierre Louis Blelly et Michel Tagger, directeurs passé et présent du LPCE, pour m'avoir accueilli au sein de leur laboratoire et m'avoir permis d'effectuer cette thèse dans d'excellentes conditions.

Je suis également reconnaissante à Jean Louis Rouet d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Merci aussi à Ondrej Santolik et Christian Mazelle qui en rapportant ma thèse avec une grande disponibilité ont aidé à améliorer ce manuscrit. Merci également à François Leufeuve et Hervé de Feraudy de s'être intéressés à mon travail et de bien vouloir juger cette thèse. Je remercie aussi Maha Ashour-Abdalla, qui même si elle n'a pas fait partie de ce jury de thèse, s'est intéressé à ce travail et a contribué à l'amélioration de ce manuscrit par ses conseils et sa relecture.

Merci également à toute l'équipe WHISPER, à ceux qui sont partis (Gille L, Xavier S, Gungor B, Alban R) comme à ceux qui sont toujours là (Xavier V, Séna K, Amélie), grâce aux outils que vous avez mis en place et que vous entretenez, cette thèse a pu se faire dans des conditions plus que confortables, merci pour les nombreux coups de mains surtout en veille de conférence !

Merci également à toute la communauté CLUSTER pour leur accueil, merci aux équipes des instruments EFW, FGM et PEACE dont j'ai utilisé les données dans cette thèse.

Je voudrais aussi remercier quelques personnes du CETP avec lesquelles j'ai pu travailler en collaboration, Patrick Canu pour les conseils et les discussions instructives qu'on a pu avoir. Dominique Fontaine pour son aide précieuse lors du traitement des données de l'instrument PEACE. Et également Bertrand Lembège pour la collaboration qu'on a eu pour utiliser le code particule, même si l'on a pas été au bout des applications que l'on voulait faire, j'espère pouvoir

mener à bien cette partie dans l'avenir, je n'oublierais pas de remercier Jean Noel le Bœuf qui nous a aidé « de loin » dans le debuggage du code E2S utilisé.

Des remerciements également à tous les personnels techniques et administratifs du LPCE, mais aussi de l'université, qui ont aidé au bon déroulement de cette thèse.

Toute ma gratitude va aussi à Michèle Schillewaert pour son aide dans les recherches bibliographiques, pour son écoute et ses encouragements.

Merci également toutes les personnes du LPCE que j'ai pu côtoyer durant ces années, même si vous ne m'avez pas beaucoup vue à la « cafet », j'ai apprécié les quelques moments de détente que j'ai pu y passer.

Merci à Guillaume, qui a commencé à me supporter durant le DEA, et qui a continué durant la thèse. Et à Aurélie pour ses encouragements, sa relecture, et ses conseils avisés.

Durant cette thèse, j'ai partagé mon bureau avec Sandrine « whispette bis » qui est maintenant au MSSL, même si quelques kilomètres nous ont séparés sur la fin, tu as toujours su rester à l'écoute et m'encourager, merci pour tes conseils et ton amitié qui continuera longtemps j'espère, à d'autres beaux voyages !

Merci également à Fabien, pour nos échanges nombreux par mel, pour tes encouragements à distance, pour les relectures que tu a pu faire de la thèse ou de l'article.

Je n'oublierais pas Alexandra Géraldine et Katia et mes amis de promo à l'USTHB d'Alger : Kahina, Roza, Nawel, Hinda et Reda , merci de vos encouragements et de votre soutien.

Durant toutes ces années d'aller retour Chartres-Orléans, j'ai pris la ligne 1 du Transbeauce, merci donc à tous les chauffeurs et habitués qui ont fait paraître les trajets moins long , et qui m'ont entre autres attendu quelques minutes lors d'impressions de poster ratés et réveillée à mon arrivée.

J'en profite aussi pour remercier de tout mon cœur mes parents pour leur soutien constant, même à distance, merci de m'avoir donné goût à la science, et de m'avoir toujours encouragée

A tous les membres de ma famille qui par leur présence ou leurs encouragements ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Une dernière pensée enfin à Amine, Amel et leur papa Fewzi qui ont fait que les « à côté de thèse » soient plus agréables, et qui ont supporté une maman pas toujours présente. Merci à toi Fewzi pour ta patience, et ton affection, et pour avoir été toujours présent dans les moments critiques.

Sommaire

Introduction générale	13
------------------------------	-----------

PARTIE 1 Contexte général

Chapitre 1: La magnétosphère terrestre et la plasmasphère	19
--	-----------

I.1 Environnement magnétique terrestre.....	19
I.2 La magnétosphère et ses différentes régions	20
I.2.1 Le choc d'étrave	21
I.2.2 Magnétogaine et magnétopause	21
I.2.3 Les cornets polaires	22
I.2.4 Les lobes et la queue de la magnétosphère.....	23
I.2.5 Les zones aurorales.....	23
I.2.6 La plasmasphère	24
I.2.7 Le courant annulaire et les ceintures de radiation	27
I.3 Activité géomagnétique.....	27
I.3.1 L'indice DST	28
I.3.2 Les indices d'activité aurorale Au, Al et AE.....	28
I.3.3 L'indice Kp.....	29

Chapitre 2: Ondes électrostatiques électroniques	31
---	-----------

II.1 Caractéristiques	32
II.2 Observations antérieures	33
II.2.1 Caractéristiques spectrales	34
II.2.2 Classifications existantes et propriétés statistiques.....	42
II.3 Mécanismes de génération	46
II.4 Intensité des ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$ et aurores diffuses.....	48
II.5 Bilan	51

PARTIE 2 Données étudiées et Moyen d'étude

Chapitre 3: Données étudiées	55
-------------------------------------	-----------

III.1 La mission CLUSTER.....	55
III.2 Orbitographie et distance de séparation des satellites	56
III.3 Instruments embarqués à bord	59
III.3.1 L'instrument WHISPER	62
III.3.2 L'instrument EFW	64

III.3.3 L'instrument PEACE	64
III.3.4 L'instrument FGM.....	66
III.3.5 L'instrument STAFF.....	67
Chapitre 4: Moyens d'études	69
IV.1 Fréquences caractéristiques	69
IV.2 Méthodes de traitement d'image pour la détermination des modes propres du plasma	72
IV.2.1 Méthode d'identification des fréquences de résonance	73
IV.2.2 Méthodes des maxima d'intensité pour la détermination des ondes électrostatiques dans la plasmasphère.....	76
IV.2.3 Algorithmes de détection automatique dans la plasmasphère	78
IV.3 Orientation par rapport au champ magnétique	83
IV.3.1 Taux de modulation et directivité	83
IV.3.2 Calcul instantané de l'orientation par rapport à B	85
IV.4 Résolution de l'équation de dispersion : modes propres du plasma.....	71
IV.4.1 Equation de dispersion des ondes électrostatiques	73
IV.4.2 Code de calcul numérique WHAMP	77
IV.4.3 Codes particules.....	78
 PARTIE 3 Données ondes et particules dans la plasmasphère	
Chapitre 5: Observation d'ondes dans la plasmasphère	89
V.1 Observation d'ondes plasmasphériques.....	89
V.2 Emissions électrostatiques équatoriales.....	94
V.2.1 Caractéristiques spectrales des émissions équatoriales.....	94
V.2.2 Structures fines des émissions équatoriales	100
V.2.3 Influence de la fréquence plasma sur le nombre d'harmoniques :.....	104
V.2.4 Modulation des ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$	114
V.2.5 Emissions hors équateur magnétique.....	114
V.2.6 Conclusion	119
V.3 Emissions électrostatiques aux $n(1.1)f_{ce}$	121
V.3.1 Caractérisation en fréquence.....	123
V.3.2 Orientation par rapport au champ magnétique B	124
V.4 Observation d'ondes aux nf_{ce}	125
V.4.1 Caractéristiques spectrales	125
V.4.2 Direction de propagation.....	128
V.5 Conclusion	131
 Chapitre 6 : Etude statistique sur les observations plasmasphériques	133
VI.1 Terminologie et proportion des différentes observations	133
VI.2 Etude statistique sur les émissions électrostatiques aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$	139
VI.2.1 Rappel sur la méthode de détection automatique	139

VI.2.2 Dépendance à la latitude magnétique	141
VI.2.3 Dépendance en secteur MLT	143
VI.2.4 Intensité des émissions	152
VI.2.5 Conclusion	156
VI.3 Etude statistique des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$	157
VI.3.1 Dépendance au secteur MLT	159
VI.3.2 Dépendance à la latitude magnétique	161
VI.4 Etude statistique sur les émissions aux nf_{ce}	162
VI.4.1 Position en secteur MLT	163
VI.4.2 Valeurs de la fréquence plasma équatoriale	164
VI.5 Influence de l'activité géomagnétique	165
VI.5.1 Variations de l'indice Kp	166
VI.5.2 Variations de l'indice Dst	168
VI.5.3 Variations de l'indice AE	171
VI.6 Conclusion	174
Chapitre 7: Données particules dans la région équatoriale	177
VII.1 Données particules dans la région équatoriale : Corrélation avec les observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$	177
VII.1.1 Populations électroniques	178
VII.1.2 Evolution de la fonction de distribution	182
VII.1.3 Signatures particulières de la fonction de distribution	184
PARTIE 4 Génération des ondes électrostatiques	
Chapitre 8: Simulation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$: utilisation d'un code 2D-1/2	191
VIII. 1 Courbes de dispersion obtenues par la théorie linéaire	191
VIII.1.1 Code de calcul numérique WHAMP	191
VIII.1.2. Courbes de dispersion et taux de croissance pour les émissions électrostatiques autour des $(n+1/2)f_{ce}$	192
VIII. 2 Utilisation d'un code particule	194
VIII. 2. 1. Modèle électrostatique 2-1/2 D	194
VIII. 2. 2. Simulation test en propagation perpendiculaire	196
VIII. 2. 3. Modes observés	198
Conclusion générale	205
Annexes	211
Annexe 1: Coordonnées et Paramètres	213
Annexe 2: Ondes dans un plasma	217
Annexe 3: Codes particules et fonction d'autocorrélation	230
Annexe 4: Articles Publiés	235
Publications et Communications	269

Introduction générale

Les aurores polaires observées sur Terre ont depuis toujours fasciné par le magnifique spectacle qu'elles offraient. Les premières observations datent des périodes de la Grèce antique. Ces aurores sont la preuve directe de l'interaction du vent solaire avec le champ magnétique dipolaire de la Terre. En 1931, Chapman et Ferraro montrent que la Terre se comporte comme un obstacle à l'écoulement du vent solaire, l'impact du vent solaire confine le champ magnétique terrestre dans une cavité nommée magnétosphère. De nombreuses sous-régions composent la magnétosphère, comme les cornets polaires, les zones aurorales, la plasmasphère, le feuillet de plasma ou les lobes. Ces différentes régions sont caractérisées par des plasmas de diverses origines et de diverses températures.

Une des questions qui se pose dans l'étude de la magnétosphère est de comprendre d'où proviennent les particules, comment elles se déplacent et comment elles peuvent disparaître. Étant donnée la faible densité des particules dans la magnétosphère, le milieu est considéré sans collisions. Dans un tel milieu, les ondes vont jouer un rôle fondamental pour effectuer les transferts d'énergie entre les différentes populations de particules chargées. Dans cette étude, nous nous intéressons aux ondes électrostatiques électroniques de la magnétosphère interne, dont une catégorie (les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$), a souvent été associée aux aurores diffuses. Plus généralement, les ondes électrostatiques, marqueurs de propriétés locales du plasma, sont intéressantes à revisiter par une mission multipoints, qui vise à mettre en relief la structure spatiale des caractéristiques du milieu.

Ces ondes électrostatiques électroniques sont observées aussi bien dans les plasmas de laboratoire que dans les magnétosphères des planètes magnétisées. Les premières observations de ces ondes électrostatiques, dans la magnétosphère terrestre, datent de la fin des années soixante avec les données de OGO5. Ces ondes sont généralement localisées entre deux harmoniques successives de la gyrofréquence électronique et sont couramment appelées «electron cyclotron harmonics » ou $(n+1/2)f_{ce}$. Elles sont caractérisées par de faibles distances de propagation et une composante de champ magnétique quasi nulle. Plusieurs études se sont intéressées à la caractérisation de ces ondes. Elles apparaissent comme étant confinées près de l'équateur magnétique.

La caractérisation spectrale de ces ondes a montré que leur position en fréquence n'est pas aussi simple qu'il y paraît, montrant même une structure fine pour certaines d'entre elles. Des études statistiques ont porté sur l'amplitude de ces ondes et leur possible implication dans la précipitation des électrons menant aux aurores diffuses sans apporter de réponse définitive à cette question. Enfin, diverses théories ont été proposées pour expliquer le mécanisme de génération de ces ondes. Ces théories, basées sur des formes particulières de la fonction de distribution, ne sont pas toujours reliées à des conditions réelles d'observation. De nombreuses études restent donc à faire pour caractériser ces ondes en fréquence, pour décrire plus précisément les structures fines de ces ondes qui ne sont pas expliquées par les théories actuelles, pour déterminer les fonctions de distribution électronique simultanées à l'observation de ces ondes électroniques et enfin pour analyser de façon statistique l'amplitude de ces ondes afin d'évaluer leur implication dans la précipitation des électrons. L'ensemble de ces points est abordé dans cette thèse.

La mission CLUSTER est une mission novatrice qui est bien adaptée pour ces études.

Elle est composée de quatre satellites identiques orbitant sous la forme d'un tétraèdre. Cette disposition tétraédrique autorise pour la première fois une étude spatiale et temporelle des structures traversées et des phénomènes rencontrés. L'orbite de CLUSTER permet de traverser clairement et sans ambiguïté l'équateur magnétique lors du passage au périégée, ce qui est utile pour caractériser la région équatoriale de la plasmasphère. L'instrument WHISPER dédié à la mesure des fréquences propres du plasma permet également l'enregistrement et la caractérisation des ondes naturelles du

milieu. La bonne résolution temporelle et fréquentielle de l'instrument donne accès aux structures fines des émissions observées. L'utilisation des mesures des quatre satellites permet de mettre en évidence l'importance de la distance radiale à la plasmopause sur l'observation des ondes électrostatiques et sur l'intensité de ces ondes.

A partir des données de l'instrument WHISPER et aussi en utilisant les données d'autres instruments à bord de CLUSTER, nous pouvons caractériser les émissions naturelles observées dans la région de la plasmasphère. L'instrument PEACE va nous donner des informations sur les signatures électroniques et sur les fonctions de distribution observées simultanément aux émissions naturelles.

La première partie de cette thèse est consacrée à la présentation du contexte général c'est-à-dire la magnétosphère terrestre (Chapitre 1) et les ondes électrostatiques étudiées (Chapitre 2).

La deuxième partie de ce manuscrit décrit les moyens d'étude que nous avons eu à notre disposition. Nous présentons la mission CLUSTER et les différents instruments utilisés dans cette étude dans le Chapitre 3. Nous présentons aussi les différentes techniques qui ont été utilisées pour traiter les données, telles que les méthodes basées sur le traitement d'image pour déterminer les caractéristiques en fréquence, en intensité et en largeur de bande des ondes observées dans le Chapitre 4.

La troisième partie, est consacrée à l'étude des données ondes et particules dans la plasmasphère sous différents aspects.

Nous commençons tout d'abord, dans le Chapitre 5, par une étude morphologique et descriptive des ondes naturelles reliées à la gyrofréquence électronique observées dans la région de la plasmasphère. Nous mettons en évidence leurs caractéristiques spectrales, leurs intensités et leurs largeurs de bande, ce qui nous permet d'identifier clairement les émissions les unes par rapport aux autres. Nous nous focaliserons sur trois types d'émissions naturelles par la suite ; ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ et aux ondes autour de nf_{ce} .

Le Chapitre 6 est consacré à une étude plus systématique de ces observations. Pour cette étude statistique trois années de données WHISPER seront étudiées, nous verrons notamment les localisations en secteur MLT et en latitude magnétique des différentes émissions observées. Nous mettrons en évidence l'importance de la distance radiale à la plasmopause sur le type d'émissions observées, et nous définirons un proxy

relié à nos mesures pour quantifier cette distance. Nous évaluerons enfin l'importance de l'activité géomagnétique sur chaque type d'émissions observées.

Nous étudierons, dans le Chapitre 7, les signatures des flux électroniques et des fonctions de distribution données par l'instrument PEACE dans la région équatoriale de la plasmasphère afin de voir les corrélations entre les signatures des données électroniques et les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

La dernière partie de ce manuscrit est consacrée à la génération des ondes électrostatiques, nous présenterons dans le Chapitre 8 quelques méthodes utilisées dans la littérature, puis nous présenterons une approche par simulation numérique qui a été entreprise en utilisant un code particule 2-1/2D. Cette approche pose les jalons pour reproduire les structures fines des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ étudiées.

Nous terminerons enfin par une conclusion générale et quelques perspectives qu'ouvre ce travail.

Partie 1

Contexte général

Dans cette partie, nous présentons le contexte général de ce travail. Nous commençons par la présentation de la magnétosphère et de la plasmasphère terrestre dans le Chapitre 1. Nous rappellerons ensuite les propriétés des ondes électrostatiques et leurs différentes signatures dans le Chapitre 2.

La magnétosphère terrestre et la plasmasphère

I.1 Environnement magnétique terrestre

La Terre est une des planètes magnétisées du système solaire. Sans perturbations extérieures, le champ magnétique terrestre peut être approximé par un dipôle incliné d'environ 11° (Barker et al., 1986) par rapport à l'axe de rotation (Figure 1.1).

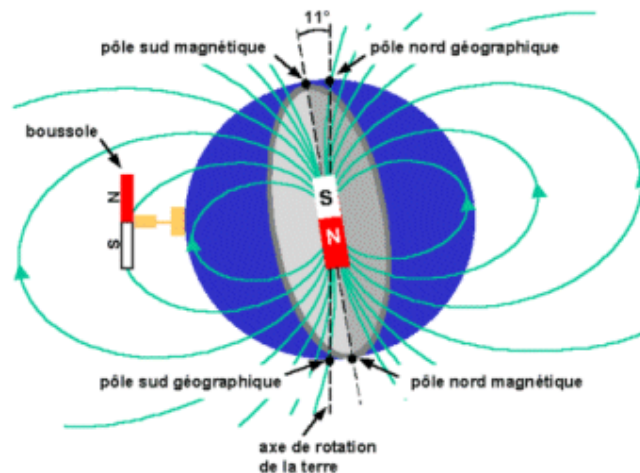


Figure 1.1: *Champ magnétique terrestre en l'absence de perturbations extérieures.*

Les lignes de champ magnétique pointent vers l'espace dans l'hémisphère sud et vers la surface de la Terre dans l'hémisphère nord. En ordre de grandeur, la magnitude du champ magnétique varie selon la latitude atteignant à la surface de la Terre une valeur de $50 \mu\text{T}$ près de l'équateur magnétique.

La Terre étant plongée dans le milieu interplanétaire, elle subit en permanence l'effet du vent de particules chargées provenant du soleil, appelé vent solaire. Ce vent de particules chargées a été décrit par Biermann (1951) et observé pour la première fois expérimentalement par la mission IMP1 en 1963. Le vent solaire a une densité moyenne de $5 \text{ particules cm}^{-3}$ et une vitesse pouvant aller de $200 \text{ à } 750 \text{ km.s}^{-1}$. Il est composé d'électrons, de protons et d'ions He^{++} . L'expansion du vent solaire entraîne le champ magnétique solaire, formant le champ magnétique interplanétaire, ou IMF (Interplanetary Magnetic Field). L'orientation et l'amplitude de ce dernier sont variables.

L'interaction du vent solaire avec le champ magnétique terrestre va créer une cavité appelée magnétosphère (Gold, 1959). Du fait de la pression du vent solaire, cette cavité est dissymétrique (Figure 1.2). Elle est comprimée côté jour (direction solaire) et étirée du côté nuit (direction antisolaire) pour s'étendre jusqu'à $100 \text{ rayons terrestres } R_t$ ($R_t=6371 \text{ km}$), (Ness, 1965).

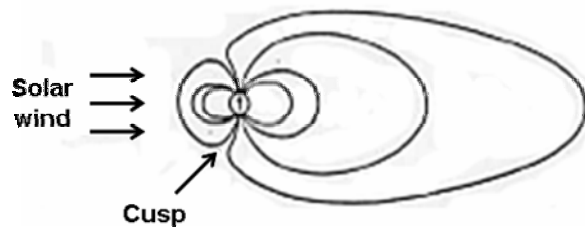


Figure 1.2: Modification du champ magnétique terrestre par la pression du vent solaire.

Nous allons maintenant présenter les différentes régions composant la magnétosphère.

I.2 La magnétosphère et ses différentes régions

La magnétosphère est composée de plasmas de différents régimes et densités de diverses origines. Selon les régimes du plasma, plusieurs régions distinctes vont donc composer la magnétosphère, comme on peut le voir sur la Figure 1.3. Elles seront décrites dans ce qui suit depuis l'extérieur de la magnétosphère vers la Terre.

I.2.1 Le choc d'étrave

Au voisinage de la Terre, la vitesse du vent solaire atteint des valeurs supersoniques, c'est-à-dire que sa vitesse est supérieure aux vitesses de groupe des ondes d'Alfvén et ondes sonores présentes dans le plasma. En rencontrant le voisinage de la Terre, le vent solaire va créer en amont une frontière appelée choc d'étrave. Au travers de celle-ci, la vitesse du vent solaire devient brusquement inférieure à la vitesse de l'onde d'Alfvén.

I.2.2 Magnétogaine et magnétopause

La frontière entre la magnétosphère, dominée par le champ magnétique terrestre, et le milieu interplanétaire, dominé par le vent solaire, est appelée magnétopause (Russell, 2003). Elle a été introduite pour la première fois par Chapman et Ferraro (1931). La magnétopause est une région frontière qui empêche la majeure partie du vent solaire de pénétrer dans l'environnement terrestre. Cependant des phénomènes tels que les fluctuations du vent solaire permettent la pénétration du plasma du vent solaire à travers la magnétopause.

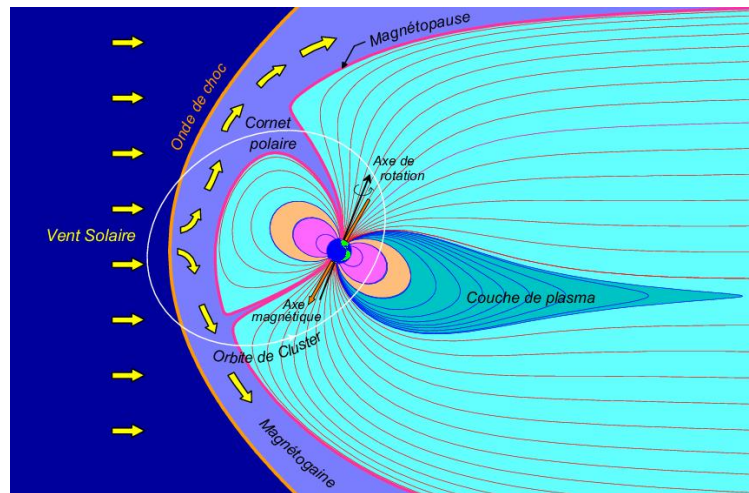


Figure 1.3: Différentes régions composant la magnétosphère terrestre.

La position de la magnétopause n'est pas statique, et peut varier en fonction de l'activité magnétique. En effet, si la pression dynamique du vent solaire augmente, la magnétopause se rapproche de la surface de la Terre.

La magnétogaine se situe entre le choc d'étrave et la magnétopause, c'est une région de plasma turbulent à densité variable. La vitesse d'écoulement à l'intérieur de cette région transitoire est plus rapide au niveau des flancs que vers la face avant.

I.2.3 Les cornets polaires

Les cornets polaires sont les seules régions de la magnétosphère terrestre où le champ magnétique est perpendiculaire à la région frontière, permettant ainsi une pénétration des particules du vent solaire jusqu'à la haute ionosphère (Heikkila et Winningham, 1971). Ces régions ont été mises en évidence par Chapman et Ferraro en 1931 et présentent des turbulences importantes. La position des cornets polaires varie en fonction de la pression cinétique du vent solaire et de l'orientation du champ magnétique interplanétaire.

I.2.4 Les lobes et la queue de la magnétosphère

Côté nuit, les lignes de champ magnétique sont ouvertes en se connectant au champ magnétique interplanétaire. Dans cette région se trouvent les lobes, régions où l'énergie magnétique est très élevée pouvant atteindre une valeur de 20 nT à proximité de la Terre. Cette région présente aussi la particularité d'avoir des densités très faibles (inférieures à 0.001 cm^{-3}) et des lignes de champ magnétique ouvertes (seule une extrémité est rattachée à l'ionosphère aurorale). Les tubes de flux se rattachent à l'ionosphère dans la calotte polaire, région délimitée par l'ovale auroral.

La région de la couche de plasma se situe entre les lobes Nord et Sud. Elle est caractérisée par la présence d'un plasma chaud piégé sur les lignes de champ fermées (les deux extrémités sont rattachées à l'ionosphère) avec un champ magnétique plus faible que dans les lobes et un nombre de particules plus important ($0.1 \text{ à } 1 \text{ cm}^{-3}$).

I.2.5 Les zones aurorales

Ce sont deux régions circulaires autour des pôles magnétiques nord et sud. On y observe communément les aurores polaires (Figure 1.4).

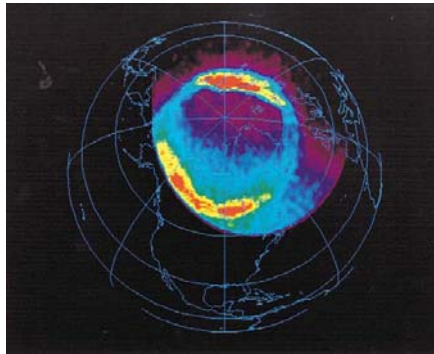


Figure 1.4: *Ovale auroral observé par le satellite Polar dans l'hémisphère nord (1996).*

Les aurores polaires sont dues à la précipitation dans l'atmosphère de particules énergétiques provenant de la magnétosphère, excitant les molécules et produisant cette luminescence lors de la désexcitation de ces molécules.

D'autres types d'aurores, cette fois-ci dites diffuses, se présentent sous la forme d'une bande uniformément lumineuse, très étendue en longitude et large de plusieurs dizaines de kilomètres en latitude. Les aurores diffuses ont pour origine la précipitation à travers un phénomène de diffusion angulaire, d'électrons d'énergies plus faible provenant de la région de la queue magnétosphérique lors de sous orages. Cette région présente également un grand intérêt en raison des différents types d'ondes qui y sont observées.

I.2.6 La plasmasphère

La plasmasphère (Figure 1.5) est une région toroïdale de la magnétosphère interne de la Terre. Elle est peuplée de plasma dense ($\sim 10^3$ à 10^4 cm⁻³) d'origine ionosphérique piégé le long des lignes de champ magnétique dipolaire (Lemaire et Gringauz, 1998 ; Ganguli et al., 2000). Elle est composée d'électrons et d'ions positifs : de protons H^+ (~90%), d'Hélium He^{++} et d'oxygène O^+ (Comfort, 1986). Lors de périodes de faible activité magnétique, des particules d'origine ionosphérique vont remonter le long des lignes de champ magnétique contribuant ainsi au remplissage de la plasmasphère. Généralement, les particules vont suivre le mouvement de corotation de la Terre le long des lignes de champ magnétique. Cependant des bulles de plasma peuvent se détacher du corps de la plasmasphère pour former des traînées denses de plasma appelées plumes (Elphic et al., 1996 ; Darrouzet et al., 2004 ; Darrouzet et al., 2006a).

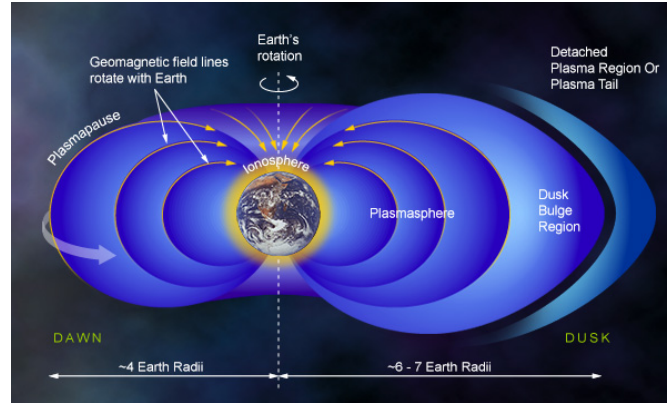


Figure 1.5: Vue de la plasmasphère dans le plan aube crépuscule d'après (windows to the universe , [http : www.windows.ucar.edu](http://www.windows.ucar.edu)).

La plasmopause (dénomination introduite par Carpenter en 1966) est la région frontière externe de la plasmasphère. Sa forme approche celle d'une coquille magnétique de faible épaisseur, à travers laquelle la densité marque un saut d'un ou plusieurs ordres de grandeur. Sa découverte a été faite de façon simultanée à partir des mesures au sol de sifflements (Carpenter, 1963) et à partir de données satellitaires (Gringauz, 1963). Elle se situe à des distances radiales comprises entre 2 et 8 R_E dans le plan équatorial, et sa position varie en fonction de l'activité magnétique. Néanmoins la plasmopause ne marque pas toujours une frontière et une différence de densité nette. En effet, la chute de densité peut être irrégulière et s'étendre sur des distances importantes, d'où la notion de « couche frontière de plasma » introduite par Carpenter et Lemaire (2004) ou PBL (plasmasphere boundary layer). La région de faible densité placée immédiatement à l'extérieur de la plasmopause est appelée « plasmatrough » en anglais (voir Figure 1. 6)

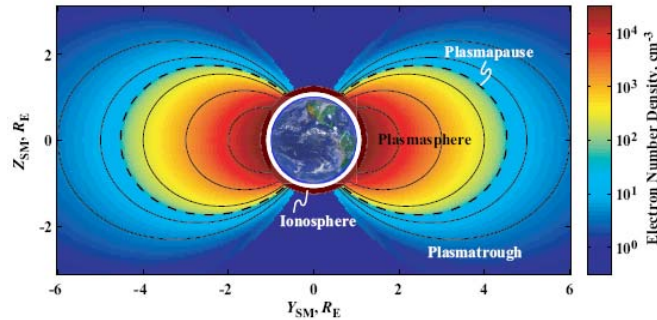


Figure 1.6: Distribution de densité dans la magnétosphère interne, avec les régions plasmopause, « plasmatrough » et plasmasphère identifiées. D'après Spasojevic, 2003

La plasmasphère n'est pas symétrique par sa forme. Elle possède une extension, nommée bulge côté crépuscule (Carpenter, 1966 ; Chappel, 1970), entre 16 et 20h en temps local magnétique MLT (pour les définitions des systèmes de coordonnées voir l'annexe1). Elle présente également un renflement du côté jour (Bezrukikh et Gringauz, 1976), c'est-à-dire autour de 12h en temps magnétique local. Outre le déplacement de la frontière qui est la plasmopause, d'autres effets peuvent apparaître à l'intérieur de la région plasmasphérique, tels que l'augmentation de vitesse de convection dans le secteur après midi, déclenchant ainsi un déséquilibre du plasma en corotation et générant l'apparition de structures telles que les plumes (Darrouzet et al., 2006 a et b ; Moldwin et al., 2004).

La région externe de la plasmasphère présente un intérêt de par les différents types d'ondes qui y ont été observées (Figure 1.7), tels que les émissions à $(n+1/2) f_{ce}$ (ou f_{ce} est la gyrofréquence électronique) observées pour la première fois par Kennel et al., (1970), le Hiss plasmasphérique (Dunckel et Helliwell, 1969), le bruit équatorial (Nemec et al. 2006) ou le Chorus (Parrot et al., 2003)

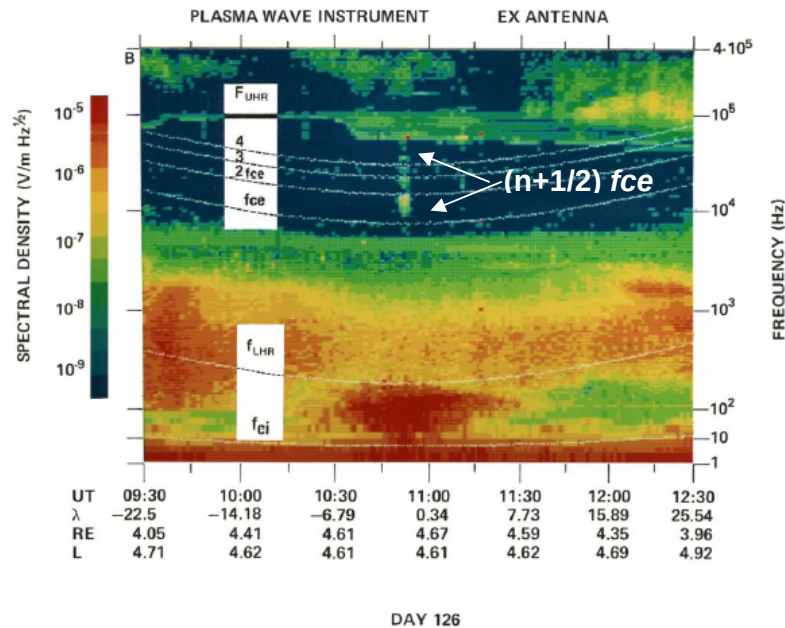


Figure 1.7: Différents types d'ondes observées lors d'une traversée de plasmasphère, d'après Olsen, (1987).

Les interactions ondes particules vont contribuer au chauffage des ceintures de radiation (Kozyra et al., 1997 ; Horne, 2002). Nous verrons plus en détail les différents types d'ondes observées, et nous nous intéresserons particulièrement aux ondes haute fréquence.

I.2.7 Le courant annulaire et les ceintures de radiation

Les ceintures de radiations sont des particules énergétiques occupant les lignes de champ magnétique sur des échelles de distances géocentriques $L=2, 7$ (L paramètre de McIlwain défini dans l'annexe 1). Ces particules ont des énergies allant de plusieurs keV jusqu'à 10 MeV pour les électrons et jusque 500 MeV pour les protons. Le mouvement de ces particules énergétiques est une combinaison entre un mouvement d'aller retour entre hémisphères opposés provenant du gradient en latitude du champ autour de la Terre (conservation du premier invariant adiabatique), et aussi une dérive azimutale de sens opposé entre les ions et les électrons résultant de la courbure du champ magnétique (conservation du deuxième invariant adiabatique). Le courant annulaire va donc apparaître dans la direction ouest résultant des dérives électroniques et ioniques. Ce courant annulaire présente une forme toroïdale. Il est centré sur l'équateur magnétique et situé entre $2 R_t$ et $9 R_t$.

I.3 Activité géomagnétique

Le vent solaire interagit avec la magnétosphère à travers un échange d'énergie cinétique, d'énergie électrique ou de quantité de mouvement. Des changements sur les paramètres du vent solaire tels qu'une augmentation de densité, de vitesse ou un changement d'intensité et de direction de l'IMF, peuvent causer des perturbations de l'activité géomagnétique. Ce transfert d'énergie peut se faire de manière plus efficace si la composante B_z de l'IMF et le champ magnétique terrestre sont de directions opposées (Burton et al., 1975). On peut aussi noter que la direction de la composante B_z du champ magnétique interplanétaire IMF est fortement corrélée au niveau de l'activité magnétique (Murayama, 1982).

Les perturbations de l'activité géomagnétique peuvent durer plusieurs heures lors de sous-orages (Akasofu, 1964) ou durer plusieurs jours dans le cas d'orages magnétiques de grande amplitude (Lui et al., 1987). La manifestation la plus apparente de ces perturbations est l'augmentation des fluctuations du champ magnétique terrestre. Cette augmentation provient du changement des systèmes de courant ionosphériques et magnétosphériques. Les mesures de l'intensité de ces différents types de courants par des réseaux de stations magnétiques à la surface de la Terre vont donner une indication sur l'augmentation de l'activité géomagnétique. Nous citerons par exemple les indices Dst, Kp, AE qui seront utilisés dans ce manuscrit.

I.3.1 L'indice Dst

Lors de sous orages magnétiques des particules énergétiques provenant de la queue vont être injectées dans la magnétosphère interne, et venir renforcer le courant annulaire. Celui-ci va donc être perturbé et affecter le champ magnétique à la surface de la Terre. La mesure de la l'intensité de l'anneau de courant est faite par des magnétomètres localisés à des latitudes moyennes et équatoriales. L'indice Dst introduit par Saguira, (1964) donne une bonne estimation de l'énergie portée par les particules de l'anneau de courant et donne un bon indicateur du déclenchement de sous orages magnétiques.

I.3.2 Les indices d'activité aurorale Au, Al et AE

Les indices Au (Auroral Upper), AE (Auroral Electrojet) et Al (Auroral Lower) caractérisent les courants électriques circulant dans l'ionosphère à des régions de haute latitude. Ils ont été définis par Davis et Saguira (1966). L'indice AE est déduit à partir des variations de la composante horizontale du champ magnétique. La valeur minimale des mesures prises dans l'hémisphère nord par une dizaine de stations autour de l'oval aurorale va donner l'indice Al, la valeur maximale l'indice Au, l'indice AE est la

différence algébrique entre ces deux valeurs $AE = A_u - A_l$. Un changement important de valeur de l'indice AE indique un changement du système de courant de l'électrojet auroral et donc une injection de particules dans les zones aurorales.

I.3.3 L'indice Kp

L'indice Kp (pour planetarische Kennziffer ou indice planétaire en allemand) a été introduit par Bartels en 1939. Il représente une mesure moyenne des variations du champ magnétique terrestre, basé sur les données de 13 observatoires géomagnétiques, 11 situées dans l'hémisphère nord et 2 dans l'hémisphère sud. La valeur du Kp est obtenue en moyennant sur 3 heures la variation du champ magnétique la plus perturbée. Cette moyenne est ensuite convertie en échelle logarithmique allant de 0 à 9.

Ondes électrostatiques électroniques

Dans cette thèse, nous allons nous intéresser aux ondes électrostatiques observées dans la partie externe de la plasmasphère terrestre. Dans cette région, fortement magnétisée, nous nous intéresserons plus particulièrement aux ondes reliées aux gyrofréquences électroniques. Ces ondes sont caractérisées par une composante du champ magnétique quasi nulle et ont donc de faibles distances de propagation. Elles apparaissent généralement entre deux harmoniques successives de la gyrofréquence électronique f_{ce} (voir Annexe 2) et sont couramment appelées ‘electron cyclotron harmonics waves (ECH)’ ou bien ‘ondes $(n+1/2) f_{ce}$ ’. Cette dernière dénomination n’est pas toujours adaptée puisque la fréquence des ondes observées varie de $(n+0.1) f_{ce}$ à $(n+0.9) f_{ce}$. Des ondes de ce type peuvent être observées dans différentes régions de la magnétosphère, allant de la magnétopause pour les ‘totem pole emissions’ (Usui et al., 1999) à la frontière de la plasmopause (Christiansen, 1978 a et b ; Kennel, 1970 ; El-Lemdani Mazouz et al., 2007).

Un des intérêts de leur étude est leur possible implication dans les phénomènes de diffusion d’électrons du feuillet de plasma menant aux aurores diffuses (Lyons, 1974 ; Kennel et Ashour-Abdalla, 1982). Un autre intérêt est que ces ondes constituent un moyen de diagnostic efficace pour déterminer les propriétés du plasma, puisqu’elles sont liées aux caractéristiques du milieu (Canu et al., 2001 ; Trotignon et al., 2001). Avant de voir les résultats obtenus grâce à la mission CLUSTER, nous allons d’abord évoquer les principales caractéristiques de ces ondes, puis nous allons résumer les observations précédentes, et rappeler les classifications existantes des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$. Nous allons aussi rappeler les théories avancées pour expliquer leur

génération. Enfin, nous étudierons leur possible implication dans le phénomène des aurores diffuses, au vu des études antérieures à CLUSTER.

II.1 Caractéristiques

Les ondes électrostatiques électroniques sont liées aux oscillations des électrons. Ces ondes sont quasi électrostatiques (courtes distances de propagations) et ne peuvent donc pas être observées en dehors du plasma dans lequel elles sont émises. Elles sont uniquement détectées par des mesures satellite in situ, (contrairement aux ondes électromagnétiques telles que le sifflement ou whistler qui sont observées au sol).

Les vitesses caractéristiques de ces ondes électrostatiques (vitesse de phase ω/k , vitesse de groupe $\partial \omega / \partial k$) sont de l'ordre de grandeur de la vitesse thermique des électrons du milieu (quelques milliers de km.s^{-1}) avec des énergies allant de quelques électrons volts à plusieurs centaines d'électrons volts, contrairement aux ondes électromagnétiques pour lesquelles les vitesses sont de l'ordre de grandeur de la vitesse de la lumière c .

Les ondes électrostatiques résonnent donc avec les électrons thermiques du plasma (énergie eV - keV). Elles peuvent être à l'origine de la précipitation d'électrons menant aux aurores diffuses (Kennel et al., 1970). Plusieurs études ont porté sur l'amplitude de ces ondes, afin de déterminer si elles sont suffisamment intenses pour causer cette précipitation (Belmont et al., 1983 ; Horne et al., 2003 ; Roeder et Koons, 1989 ; El-Lemdani Mazouz et al., 2007) sans apporter de réponse définitive à cette problématique (voir partie II. 5).

Nous rappelons dans ce qui suit les différentes observations d'ondes électrostatiques par des satellites orbitant dans la magnétosphère terrestre.

II.2 Observations antérieures

Les ondes électroniques électrostatiques sont aussi bien observées dans la magnétosphère terrestre (Kennel et al., 1970), que dans les magnétosphères d'autres planètes magnétisées (Kurth et Gurnett, 1991), elles ont aussi été observées dans des plasmas de laboratoire (Krafft et al., 1992).

Dans cette thèse, nous allons nous intéresser aux observations dans la magnétosphère terrestre. De nombreuses missions satellitaires ont observé ces émissions à des fréquences, des intensités et des extensions en latitude différentes. Toutefois, il apparaît que les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont souvent confinées près de l'équateur magnétique, (Fredericks et Scarf, 1973 ; Christiansen et al. 1978b ; Roeder et Koons, 1989). Il est donc nécessaire de traverser la région équatoriale afin de décrire correctement ces émissions.

Le tableau suivant rappelle les différentes missions (noms et dates de lancement) qui ont observé des émissions électrostatiques aux $(n+1/2) f_{ce}$ ainsi que leur orbitographie.

Satellite	Orbitographie			
	Perigée (km)	Apogée (km)	Inclinaison (°)	Période (h)
OGO 5 4 Mars 1968	270	146000	31	62
IMP 6 13 Mars 1971	6610	212630	28.7	96
Hawkeye 3 Juin 1974	6840	130850	89.8	49.9
GEOS 1 20 Avril 1977	2120	37500	26.3	12
GEOS 2 14 juillet 1978	Géostationnaire			
ISEE 1 22 Octobre 1977	287	138000	28.6	59
ISEE 2 22 Octobre 1977	287	138000	28.6	59
SCATHA 30 janv 1979	27553.0	43239.0	7.7	23.6
DE 03Aout 1981	6952,16	29658,33	89.9	7.5
CREES 25 juillet 1990	305	35768	18.15	9.52
AMPTE IRM	557	118629	28.6	

Tableau 2.1: Paramètres orbitaux des différentes missions (noms et dates de lancement) ayant observé des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Comme on peut le voir ces satellites ne traversent pas tous de la même façon l'équateur magnétique. Les satellites avec une inclinaison faible ou modérée vont avoir tendance à situer ces observations autour de l'équateur magnétique ($\pm 2^\circ$) parfois de manière inexacte, puisque la position de l'équateur magnétique issue de modèles peut varier de quelques degrés (Gough et al., 1981). Pour les satellites ayant une grande excentricité, tel IMP6, l'équateur magnétique est traversé à des distances radiales qui ne sont pas appropriées pour l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$. Pour les satellites avec une excentricité faible et une faible inclinaison (SCATHA, GEOS 2), l'intensité maximale des ondes peut être occultée car se manifestant dans une partie non couverte par l'orbite.

L'orbite de CLUSTER (Escoubet et al., 1997) permet de traverser de façon claire et non ambiguë l'équateur magnétique lors du périégée, (plus de détails sur l'orbite de CLUSTER sont fournis dans le Chapitre 3). Nous allons détailler dans ce qui suit les différentes caractéristiques spectrales des ondes électrostatiques électroniques observées par les missions listées dans le Tableau 2.1.

II.2.1 Caractéristiques spectrales

Les premières observations d'ondes électrostatiques électroniques aux $(n+1/2)f_{ce}$ dans la magnétosphère terrestre datent de la fin des années soixante, avec les observations de l'instrument VLF à bord de OGO 5. Leur dénomination vient du fait qu'elles sont présentes entre deux gyrofréquences électroniques successives.

Un exemple des observations de OGO 5 est donné sur la Figure 2.1 où l'on peut voir une seule harmonique observée à une fréquence f autour de $1.25 f_{ce}$.

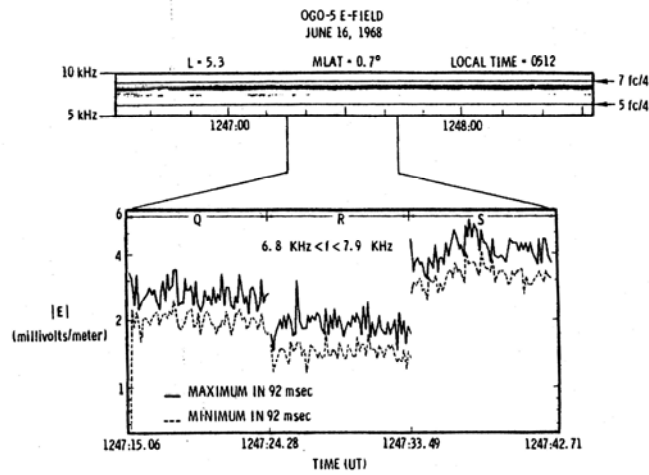


Figure 2.1 : Observation d'une harmonique autour de $3/2 f_{ce}$ par le satellite OGO5, (D'après Kennel et al., 1970).

Le spectrogramme des données de OGO 5 n'est pas représentatif de l'ensemble des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ qui peuvent apparaître. En effet, celles-ci peuvent être observées avec des signatures spectrales différentes, que nous allons rappeler dans ce qui suit.

II.2.1.a Ondes autour de $3/2 f_{ce}$

Les données du satellite OGO 5 ont montré plusieurs classes d'émissions à bande étroite au dessus de la gyrofréquence électronique f_{ce} (Kennel et al., 1970), ces émissions ne possèdent pas de composante magnétique.

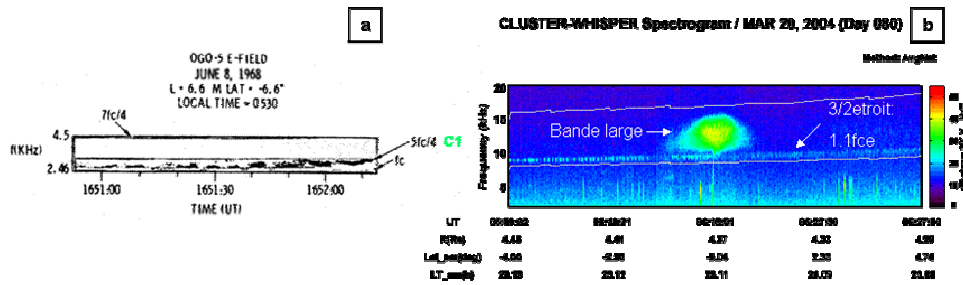


Figure 2.2 : a) Observation d'une harmonique à $f=1.25f_{ce}$ vue par l'instrument OGO 5 près de l'équateur magnétique (D'après Kennel et al., 1970). b) Observations par WHISPER/CLUSTER d'une harmonique à $f=1.1 f_{ce}$ sur un domaine de latitude étendu, et d'une bande plus large située autour de $3/2 f_{ce}$ et confinée au voisinage de l'équateur magnétique ; fréquences f_{ce} et $2 f_{ce}$ sont représentées en blanc.

Sur la plupart des données de OGO 5, une seule harmonique était observée, entre $1.25 f_{ce}$ et $1.75 f_{ce}$, avec des intensités dans la gamme $1-10 \text{ mV.m}^{-1}$ allant même jusqu'à 100 mV.m^{-1} . Cette dernière valeur est toutefois discutable au vu de la longueur de l'antenne (50 cm) qui est bien inférieure à la longueur de Debye du plasma (quelques mètres). Ces observations sont en majorité confinées entre ± 10 degrés de latitude magnétique. Scarf et al. (1973) ont montré que ces émissions étaient suffisamment intenses pour diffuser des électrons avec des énergies allant de 50-80 keV. Sur la Figure 2.2, on peut voir un exemple d'observations d'ondes du type $3/2 f_{ce}$, par le satellite OGO 5 à gauche, et par CLUSTER à droite. On distingue sur le spectrogramme WHISPER les deux types de signature spectrale des émissions aux $3/2 f_{ce}$: ondes près de f_{ce} , à bande étroite qui sont observées à des latitudes élevées, et ondes confinées près de l'équateur magnétique qui remplissent une partie de l'intervalle entre deux gyrofréquences électroniques successives.

L'analyse des données de IMP6 a montré que les ondes $(n+1/2) f_{ce}$ observées étaient non pas centrées autour de $3/2 f_{ce}$, mais plus proches de f_{ce} , et qu'elles étaient plus fréquemment observées pour des latitudes élevées ($\text{lat} > 20^\circ$) (Hubbard et Birmingham, 1978).

II.2.1.b Ondes multiples intenses

Christiansen et al. (1978 a et b) ont observé des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, pour $n > 1$, d'intensité relativement élevée ($0.1-10 \text{ mV/m}$), mais plus faible que celle des ondes aux $3/2 f_{ce}$. Ces bandes sont aussi dites étroites du fait de leur largeur de bande relativement faible ($df/f \sim 0.1$, df étant la largeur de bande et f la fréquence observée). Elles sont en général détectées simultanément à $3/2 f_{ce}$, bien que sur une durée plus courte. Nous présentons un exemple de ce genre d'émissions sur la Figure 2.3, reproduisant des observations de CREES. Nous verrons plus loin que ces ondes ont aussi été observées par l'instrument WHISPER.

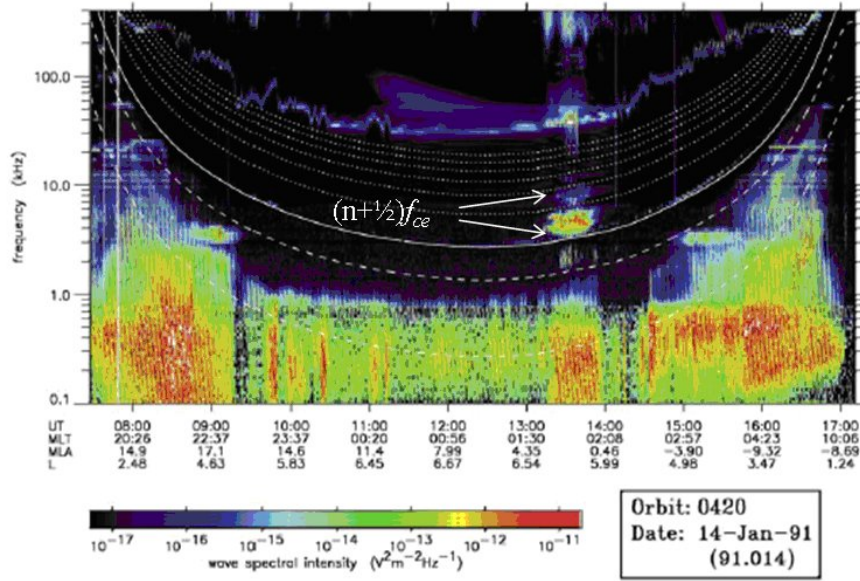


Figure 2.3 : Spectrogramme temps fréquence de données de la mission CREES avec observation d'ondes $(n+1/2)f_{ce}$ multiples à l'équateur (d'après Horne, 2003).

II.2.1.c Ondes multiples diffuses

La bonne résolution des instruments de mesure sur différents satellites (IMP6, Hawkeye, ISEE, GEOS) a permis de détecter des émissions électrostatiques peu intenses en dehors de la plasmopause, à des fréquences inférieures à la fréquence hybride haute de l'espèce la plus froide. Leur amplitude intégrée est plus faible que celle de la catégorie des multiples intenses (de l'ordre de 1 à quelques $\mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) et avec une largeur de bande plus importante ($df/f \sim 0.5$).

On peut voir sur la Figure 2.4 un exemple d'observation de bandes diffuses par l'instrument WHISPER. Ces observations s'étendent à toutes les latitudes. Elles sont typiquement plus fréquentes aux latitudes relativement élevées. Ceci est vraisemblablement dû à la présence de plasma chaud dans ces régions frontières, comme suggéré par Christiansen et al. (1978 a et b). Voir aussi Ashour-Abdalla et al. (1978 a et b), pour des considérations théoriques, ainsi que Trotignon et al. (2003), pour les mesures de plasma supra-thermique en conjonction avec les observations de bandes diffuses.

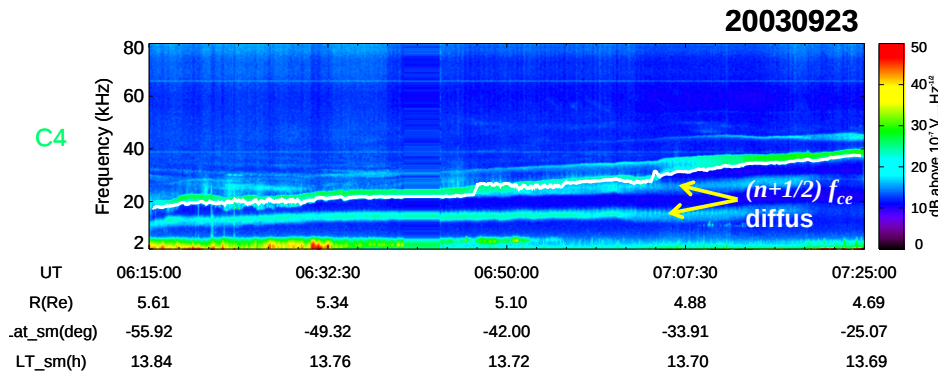


Figure 2. 4 : Exemple de $(n+1/2)f_{ce}$ diffus observé par WHISPER.

II.2.1.d Ondes près de la fréquence hybride haute f_{uh}

Mosier et al. (1973) et Shaw et Gurnett (1975) sont les premiers à mentionner l'existence d'une signature électrostatique près de la fréquence hybride haute f_{uh} . Plus précisément, ce bruit est observé légèrement au-delà de la plasmopause. L'intensité de ces ondes est relativement faible (quelques $\mu V \cdot m^{-1}$), atteignant occasionnellement la valeur de 1-20 $mV \cdot m^{-1}$.

L'arrivée de sondes à relaxation a permis de progresser dans la détermination des modes propres et donc d'identifier avec précision la fréquence des émissions observées connaissant la valeur de la fréquence hybride haute f_{uh} . Les observations de GEOS 1 ont permis de montrer que les ondes proches de f_{uh} existent de façon quasi-permanente et sont observées à des latitudes magnétiques entre -30° et 30° du côté jour. Ces émissions sont généralement de faible amplitude (quelques $\mu V \cdot m^{-1}$). Elles peuvent parfois devenir très intenses atteignant le niveau de saturation pour GEOS 1 soit 6 $mV \cdot m^{-1}$. Lorsqu'elles atteignent leur niveau maximal d'intensité, elles sont alors les ondes électrostatiques les plus intenses observées dans la magnétosphère (Christiansen et al., 1978b). Leur durée est variable allant de quelques fractions de secondes (Gough et al., 1981) à plus d'une heure.

En analysant les données d'IMP6 et d'Hawkeye, Kurth et al., (1979 a et b) ont trouvé 145 exemples d'émissions proche de f_{uh} , d'amplitude supérieures à 1 $mV \cdot m^{-1}$, avec une faible composante magnétique pour les plus intenses d'entre elles. L'occurrence de ces ondes intenses croît fortement à l'équateur magnétique. Kurth et al., (1979 a et b) ont

suggéré que ces ondes pouvaient être à l'origine du continuum non thermique par couplage de modes ou conversion de mode électrostatique en mode électromagnétique. On peut voir sur la Figure 2.5 un exemple d'observation de ces ondes intenses à f_{uh} par WHISPER

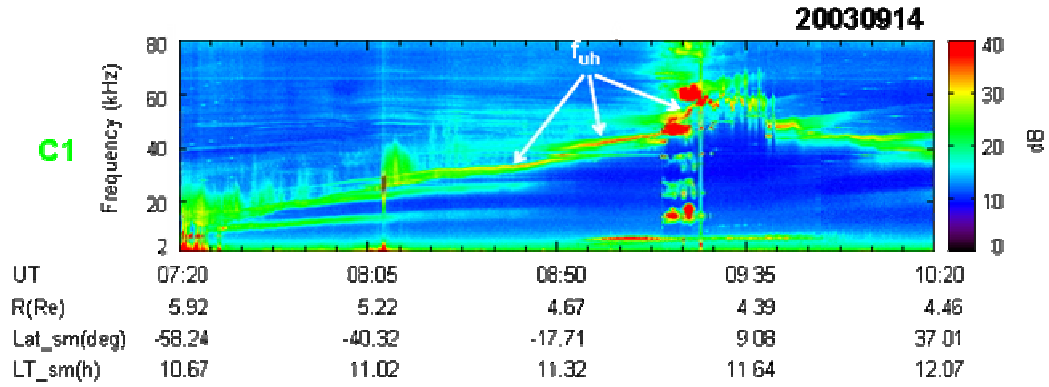


Figure 2.5 : Exemple d'observation d'émissions à f_{uh} par WHISPER indiquant une augmentation d'intensité vers l'équateur ($\sim 9:00$ TU) comparativement aux régions de plus haute latitude ($\sim 8:00$ TU).

II.2.1.e Ondes supérieures à la fréquence plasma f_{pe}

Les données SFA et sondeur à relaxation de GEOS 1 (Christiansen et al., 1978 a et b) ont montré qu'il y avait une autre classe d'émissions naturelles observées aux fréquences des ondes de Bernstein f_{qn} (pour la définition de ces ondes se rapporter à l'annexe 2), où les modes de Bernstein f_q sont identifiés à l'aide du sondeur à relaxation. Ces émissions ont aussi été observées sur les données de CLUSTER (voir partie 5. 1).

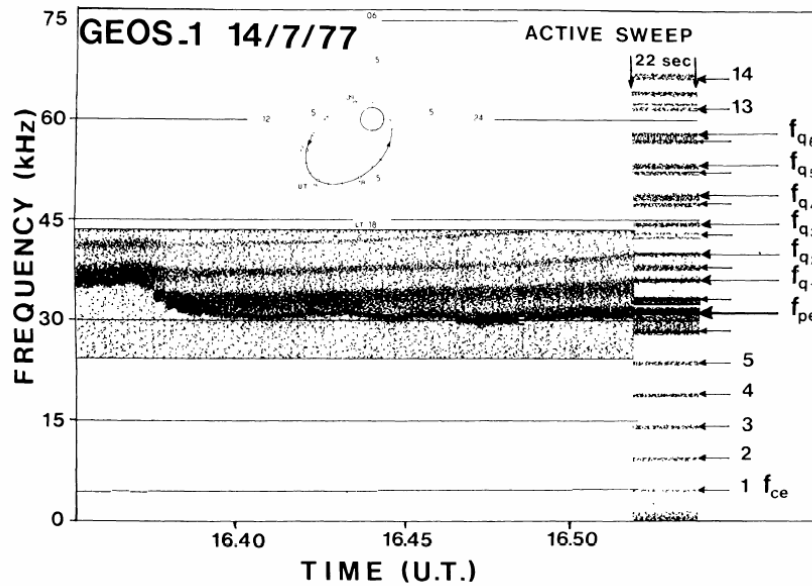


Figure 2.6: Spectrogramme des émissions naturelles enregistrées par l'instrument SFA à bord de GEOS 1. La trajectoire du satellite est donnée à titre indicatif. D'après Christiansen et al. 1978 a)

II.2.1.f Autres planètes

Les premières observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ dans les environnements magnétisés d'autres planètes datent des passages des sondes Voyager 1 et Voyager 2, notamment dans la magnétosphère de Jupiter avec les données de Kurth et al., 1980. La mission Cassini a confirmé la présence de ces ondes dans la magnétosphère de Saturne, ce qui en fait un phénomène commun et bien connu dans les magnétosphères des planètes magnétisées (Kurth et Gurnett, 1991). Les signatures spectrales de ces ondes sont tout aussi complexes que celles observées dans la magnétosphère terrestre.

Sur le spectrogramme Figure 2.7, on peut voir un exemple d'ondes multiples intenses aux $(n+1/2)f_{ce}$, observées sur six harmoniques et plus dans la magnétosphère de Saturne.

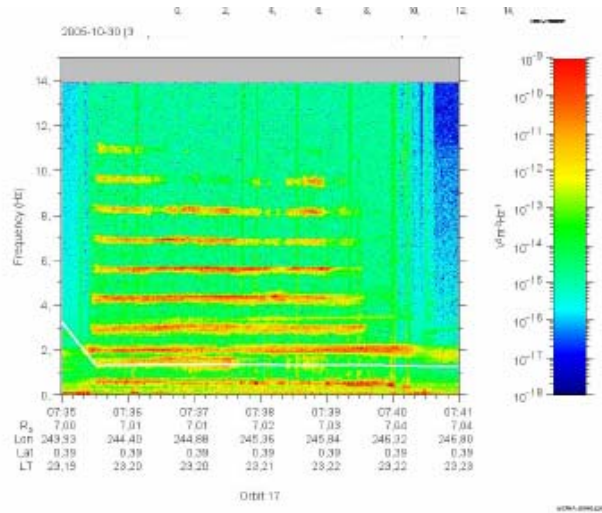


Figure 2.7: Signature des émissions aux $(n+\frac{1}{2}) f_{ce}$ dans la magnétosphère de Saturne. (Canu, 2007).

Notons que toutes ces observations font référence à une seule émission observée entre deux harmoniques successives de la gyrofréquence électronique. Toutefois, cette structure spectrale n'est pas aussi simple qu'il y paraît. En effet, Christiansen et al. (1978a) et Koons et Fennel (1984) ont mis en évidence une structure fine de ces émissions avec apparition de plusieurs « sous-structures » à l'intérieur d'une même bande d'observation. A l'aide des données de l'instrument WHISPER, nous avons mis en évidence la structure fine de ces émissions. Nous présenterons les observations de WHISPER dans le Chapitre 5

II.2.2 Classifications existantes et propriétés statistiques

La première classification des ondes électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ a été suggérée par Hubbard et Birmingham en 1978. Elle est basée sur les propriétés spectrales de ces émissions. Les observations de OGO 5 et de IMP6 ont été divisées en quatre classes en fonction des fréquences et les largeurs de bande des émissions. On peut voir sur la Figure 2.8 un résumé de celles-ci.

Cette classification reprend en partie les différentes propriétés spectrales que nous avons présentées plus haut.

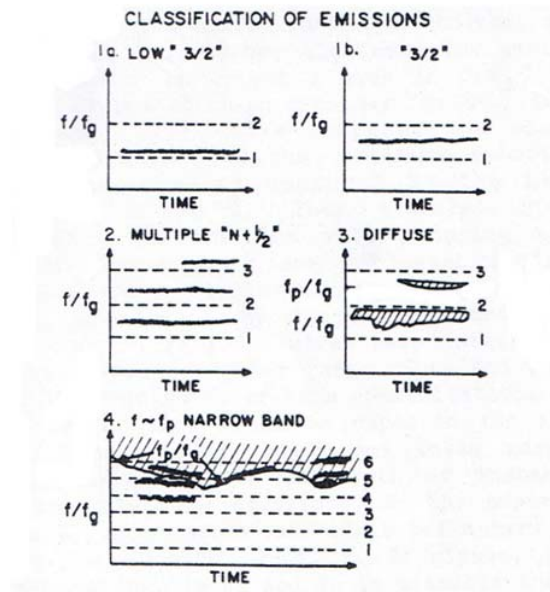


Figure 2.8 : Représentation schématique des quatre classes d'émissions électrostatiques à partir des données de IMP6 et de OGO 5, la valeur du rapport f_{pe}/f_{ce} est donnée à titre indicatif pour les classes 3 et 4, d'après Hubbard et Birmingham (1978).

En utilisant un modèle basé sur les caractéristiques du plasma, Hubbard et Birmingham (1978) ont simulé numériquement chacune de ces classes observées.

Un résumé de cette classification et des considérations théoriques est donné dans le tableau 2.2.

Classe	Nom	Fréquence	Intensité	Observation	Théorie
1a	3/2 basses	$1 < f/f_{ce} < 1.2$	$> 1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$	Obs haute lat $20 < \text{lat} < 50$	Nécessite $f \leq f_{uhc} \ll 2 f_{ce}$
1b	3/2	$1.2 < f/f_{ce} < 2$ $\Delta f / f \leq 0.2$	$> 1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$	Obs équateur	Nécessite $f_{UHC} < 2 f_c$
2	($n+1/2$) multi harmoniques	$\Delta f / f \approx 0.1$ $f_{\max} \leq f_{uhr}$	$> 1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ dans chaque bande	Obs équateur	Nécessite $f_{uhc} > 2 f_c$
3	Bandes diffuses	$f_{\max} / f_{ce} \leq 4$ $\Delta f / f_{ce} \approx 0.5$	qq $\mu\text{V} / \text{m}$	Toutes latitudes Côté jour	Peut être instable
4	$f \sim f_{uhr}$	$\Delta f / f_{ce} \approx 0.1$ $f \ll f_{\max} \sim f_{uhr}$	1-20 mV/m	Plasma pause $(n+1/2)f_{ce} = f_{uhr}$	Nécessite $n_c \gg n_H$

Tableau 2.2 : Classification des ondes électrostatiques d'après Hubbard et Birmingham (1978), le plasma est composé de deux populations de températures et densités différentes : (n_c, T_c) pour la population froide et (n_h, T_h) pour la population chaude, f_{uhr} désigne la résonance à l'hybride haute, f_{uhc} désigne l'hybride haute correspondant à la population froide.

La classe 1 de Hubbard et Birmingham (1978) est aussi bien observée côté jour que côté nuit. La classe 2 est observée plus souvent côté jour, tandis que la classe 3 et la classe 4 sont majoritairement observées côté jour.

L'étude de la répartition en latitude magnétique pour chacune de ces observations a montré que la classe 1a était plus communément observée à haute latitude, d'autre part alors que la couverture spatiale de IMP6 dans la région équatoriale n'a pas permis une étude appropriée de la classe 1b. La statistique pour les classes 3 et 4 n'était pas significative pour en ressortir des propriétés quant à leur position en latitude magnétique.

Une autre classification des émissions électrostatiques a été établie par Gough et al., (1979) à partir des données de GEOS 1 et GEOS 2. Cette classification est légèrement différente et est basée sur la densité du plasma froid qui va influencer sur la forme spectrale de ces ondes.

On peut voir un résumé des différents spectres observés dans les différentes classes sur la Figure 2.9

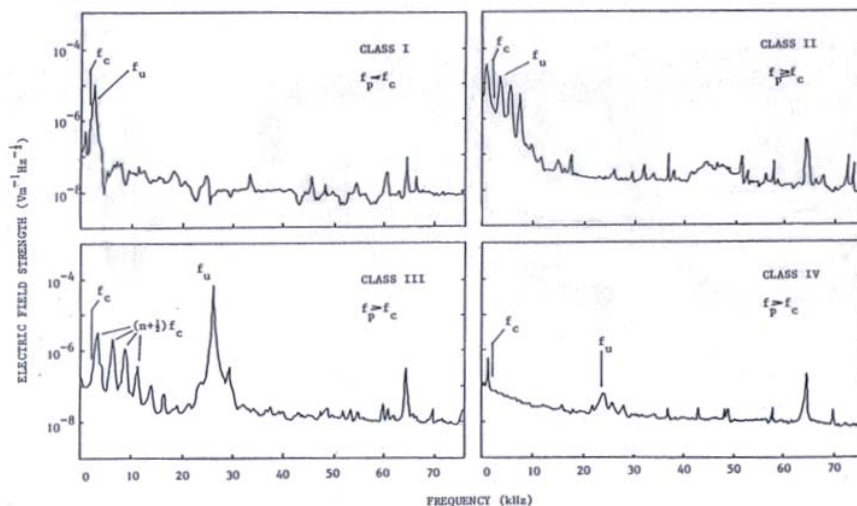


Figure 2.9 : Exemples typiques de spectre du champ électrique mesuré lors de l'apparition des émissions électrostatiques par GEOS-1 (d'après Horne, 1981).

Chacune de ces classes est observée à toutes heures locales tout au long de l'orbite géostationnaire de GEOS 2. D'après Gough (Gough et al., 1979), les ondes de classe I sont observées côté nuit, alors que celles de la classe II le sont dans le secteur matin.

Celles des classe III et IV sont observées du côté jour, avant que le satellite GEOS ne rencontre le « bulge », ou renflement plasmasphérique.

On peut donc voir à travers ces classifications que plusieurs dénominations existent dans la littérature pour des formes similaires d'observation d'ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$. La classe I de Gough (Gough et al., 1979) correspond à la classe 1a et classe 1b de Hubbard et Birmingham (1978). Les classes II et III pourraient correspondre à certaines émissions de la classe 2, alors que la classe IV peut être reliée aux bandes diffuses (classe 3 de Hubbard et Birmingham, (1978)).

Des études statistiques plus récentes concernant les émissions électrostatiques ont été faites dans la région de la magnétosphère interne. Les travaux de Roeder et Koons (1989) sont basés sur les données des satellites AMPTE-IRM et SCATHA pour étudier les émissions électrostatiques dans la région de la magnétosphère interne sur une large échelle de distances radiales, allant de 4 à 12 rayons terrestres (R_T). Il est apparu que les émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont plus fréquemment observées entre 03 et 06 MLT à des distances radiales entre 4 et 8 R_T , les émissions les plus intenses apparaissant entre 21 et 06 MLT.

D'autres études statistiques (Paranicas et al., 1992) concernent la position en fréquence des ondes électrostatiques observées entre deux harmoniques successives de la gyrofréquence électronique. Il apparaît que, pour les émissions qui sont observées à quelques degrés de latitude, la fréquence d'observation se situe dans la seconde moitié de l'intervalle entre deux gyrofréquences successives, et pour les plus intenses d'entre elles, au plus près de la limite supérieure de l'intervalle. Une exception apparaît pour les émissions dans le secteur minuit qui s'étendent à des latitudes plus élevées : la fréquence de ces émissions se situe dans la moitié inférieure de l'intervalle.

Enfin, Labelle et Ruppert (1999) ont mis en évidence de façon statistique la structure fine des émissions en étudiant les données d'AMPTE IRM : 15% des spectres observés présentaient une structure fine.

Il ressort donc de ces études statistiques que :

- Les émissions aux $(n+1/2) f_{ce}$ sont confinées près de l'équateur magnétique ;
- Elles sont souvent observées du côté aube;

- Les émissions les plus intenses sont observées entre 21 et 06 MLT, Ce qui va permettre d'étudier leur implication dans le phénomène des aurores diffuses ;
- La position en fréquence dépend du rapport f_{pe}/f_{ce} et des intensités mesurées ;
- Leur spectre en fréquence présente parfois des structures fines.

Il est nécessaire d'unifier les classifications et les dénominations citées dans la littérature, même si les conditions d'observation ne sont pas les mêmes. Nous présenterons dans le chapitre 5 une classification des émissions observées dans la plasmasphère par l'instrument WHISPER. Nous allons maintenant brièvement présenter les quelques modèles proposés dans la littérature pour expliquer la génération des ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$.

II.3 Mécanismes de génération

Pour savoir si une onde électrostatique peut se développer, il faut connaître la source d'énergie libre du milieu et déterminer la manière dont le transfert d'énergie va se faire au profit de l'onde.

Les premières études théoriques (Fredericks, 1971; Young et al., 1973 et Karpman, 1973, a et b) étaient qualitatives. Ces études ont montré que des instabilités à $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$ pouvaient être obtenues si la fonction de distribution des particules était modélisée par une population froide d'origine ionosphérique avec des énergies de l'ordre de l'eV et une population chaude provenant du feuillet de plasma avec des énergies de l'ordre du keV.

La densité des électrons froids va contrôler la fréquence de l'instabilité (Karpman 1975, a et b), tandis que leur température contrôle le taux de croissance spatial (Ashour Abdalla, 1975 ; Ashour Abdalla et Kennel, 1978 a et b).

Il a aussi été montré qu'une pente positive dans la fonction de distribution des populations chaudes, soit $\partial f / \partial v_{\perp}$ positif, pouvait être la source d'énergie libre. Cette région de gradient positif dans la fonction de distribution peut être modélisée par une fonction de distribution maxwellienne en cône de perte (Ashour Abdalla et Kennel, 1978 a). La fonction de distribution des particules est alors modélisée par une somme de populations maxwelliennes donnée par :

$$f_i(v_{\perp}, v_{\parallel}) = \frac{n_i}{\pi^{3/2} \alpha_{\perp i}^2 \alpha_{\parallel i}^2} \exp\left(-\frac{(v_{\parallel} - v_{di})^2}{\alpha_{\parallel i}^2}\right) \left[\Delta_i \exp\left(-\frac{v_{\perp}^2}{\alpha_{\perp i}^2}\right) + \frac{(1 - \Delta_i)}{(1 - \beta_i)} \left(\exp\left(-\frac{v_{\perp}^2}{\alpha_{\perp i}^2}\right) - \exp\left(-\frac{v_{\perp}^2}{\beta_i \alpha_{\perp i}^2}\right) \right) \right] \quad (\text{EQ 2. 1})$$

Où β_i et Δ_i désignent la profondeur et la largeur du cône de perte, $\alpha_{\perp i}$ et $\alpha_{\parallel i}$ désignent les vitesses thermiques dans les directions parallèles et perpendiculaire au champ magnétique, et v_{di} la vitesse de dérive.

Pour valider ces modèles il est nécessaire de relier cette modélisation de la fonction de distribution à des données en temps réel. Les premières observations de la fonction de distribution électronique proviennent des données de Hawkeye -1, Kurth et al. (1979 a). Il ressort de ces études qu'une source d'énergie libre en cône de perte est observée simultanément aux ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Les travaux de Rönmark et al. (1978), et Rönmark et Christiansen (1981) ont utilisé les données des instruments S-302 et S-310 de la mission GEOS1 afin d'ajuster les paramètres de la fonction de distribution donnée par l'équation 2.1. Le spectre en amplitude calculé à partir de la simulation numérique est en bon accord avec le spectre d'ondes mesuré.

Horne et al. (2003) ont calculé les taux de croissance des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ en utilisant des données de CREES. Des taux de croissance positifs sont observés pour la génération de la première bande harmonique. Pour cela, la fonction de distribution des particules a été ajustée numériquement, en utilisant des sommes de maxwelliennes, allant jusqu'à six populations.

Toutefois, on peut noter que ces théories prédisent l'apparition d'une seule bande d'émissions entre deux gyrofréquences électroniques successives, alors qu'il a été rapporté dans la littérature une structure multi-bande (Christiansen et al., 1978b ; Koons et Fennel, 1984 ; Labelle et Ruppert, 1999). Des effets dus à l'inhomogénéité du milieu (propagation dans des gradients de densité) pourraient expliquer ces structures fines (Barbosa, 1985).

Nous pouvons donc voir que la modélisation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ reste étroitement liée à la connaissance précise des données expérimentales concernant la fonction de distribution des populations électroniques mises en jeu. Nous étudierons

dans le Chapitre 7 les fonctions de distribution mesurées par l'instrument PEACE de la mission CLUSTER simultanément aux émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Après avoir résumé les théories existantes pour expliquer le mécanisme de génération des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, nous allons maintenant nous intéresser à leur implication dans le phénomène des aurores diffuses.

II.4 Intensité des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et aurores diffuses

Comme on l'a vu dans le Chapitre 1, les aurores diffuses sont des phénomènes permanents présents dans l'ovale auroral. Ces phénomènes résultent de la précipitation d'électrons d'énergies de l'ordre du keV avec une petite contribution de la précipitation des protons.

La source de précipitation des électrons aux énergies de l'ordre du keV est étudiée depuis les années 1970 ; mais le mécanisme dominant n'a pas encore été identifié. Deux phénomènes peuvent être à l'origine de cette précipitation : tout d'abord une interaction avec les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ (Kennel et al. 1970), ou alors une interaction avec les ondes de type whistler, bien que ce dernier mécanisme précipite des électrons de plus grande énergies (Johnstone et al., 1993).

La théorie de la précipitation par les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ s'appuie sur le fait que ces émissions résonnent avec les électrons d'énergie de l'ordre du keV, causant une diffusion angulaire de ceux-ci. L'intensité minimale des émissions susceptibles de causer cette diffusion est de l'ordre de $1\text{mV} \cdot \text{m}^{-1}$ (Lyons, 1974). Il est donc nécessaire d'estimer le pourcentage d'émissions assez intenses pour causer cette précipitation. Des études statistiques ont été faites dans ce sens, nous citerons les travaux de Belmont et al., (1983) à partir des données de GEOS2 et les travaux de Roeder et Koons, (1989) utilisant des les données de AMPTE-IRM et de SCATHA.

Dans les travaux de Belmont et al. (1983), sept mois de données ont été analysés, en regardant le secteur nuit de 22h à 6h MLT. L'orbite de GEOS se situait à l'intérieur du feuillet de plasma. L'intensité maximale observée pour la bande autour de $3/2 f_{ce}$ a été prise comme référence. La Figure 2.10 représente un histogramme des amplitudes observées à une latitude magnétique donnée : autour de 3 degrés sur la partie gauche de la Figure 2.10 et autour de 0 degrés sur la partie droite.

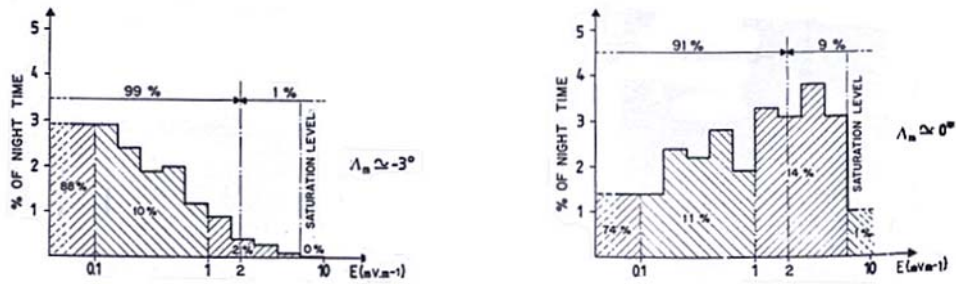


Figure 2.10 : Amplitude des émissions observées par GEOS 2 dans le secteur nuit ; à gauche, aux latitudes de l'ordre de 3° , à droite aux latitudes de l'ordre de 0° .

Pour les latitudes autour de 3° , on peut voir que le pourcentage d'émissions intenses (supérieures à $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$) est atteint dans 2% des passages, alors que dans la majorité des cas, l'amplitude atteinte est de l'ordre de $0.1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$. En étudiant plus précisément les données autour de l'équateur magnétique, il apparaît que le pourcentage des émissions intenses est atteint dans 15% des passages. L'amplitude des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ semble donc insuffisante pour diffuser les électrons thermiques et remplir le cône de perte, en tout cas à la distance radiale atteinte par GEOS 2 (Belmont et al., 1983).

Nous pouvons aussi citer les travaux de Roeder et Koons (1989) qui ont analysé l'amplitude des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées dans la région équatoriale, à partir des données de AMPTE tout d'abord, puis en élargissant aux données de SCATHA ensuite. Cette étude a confirmé que les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées dans la région équatoriale ne sont pas suffisamment intenses pour générer les aurores diffuses.

Le tableau 2.3 résume les occurrences des événements intenses aux $3/2 f_{ce}$ observés par les satellites GEOS, AMPTE IRM et SCATHA dans les régions équatoriales. Le seuil d'intensité à atteindre pour les ondes à $3/2 f_{ce}$ tiens compte de la longueur des antennes ainsi que de la largeur de bande des émissions observées. Il atteint par exemple $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ à la distance radiale couverte par GEOS2 par exemple.

En résumé, il apparaît à travers ces études statistiques que l'occurrence des événements intenses autour de $3/2 f_{ce}$ dans la région équatoriale est insuffisante pour expliquer le remplissage du cône de perte, et ce pour les latitudes d'observations étudiées.

Satellite	L(Re)	Lat,deg	E (mV. m ⁻¹)	Occurrence
GEOS2	6.6	-3	0.1	0.12
	6.6	-3	1	0.02
AMPTE IRM	4-8	+10	0.035	0.27
	8-12	+10	0.012	0.26
SCATHA	5-8	+5	0.016	0.45

Tableau 2.3 : Résumé des intensités de la première bande harmonique autour de $3/2 f_{ce}$ observées dans le secteur nuit par les satellites GEOS, AMPTE-IRM et SCATHA. D'après Roeder et Koons, (1989).

Une étude indépendante a conduit à une conclusion opposée. Horne et al, 2003, en analysant les observations de CREES lors d'un événement de sous orage, ont en effet montré que les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont responsables de la formation d'une distribution en forme de galette (« pancake »), et sont la principale cause de la diffusion des électrons menant aux aurores diffuses. On peut donc considérer que les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ peuvent, sous certaines conditions, jouer un rôle sur la précipitation des électrons dans le cône de perte.

Au vu de ces différents résultats, une étude statistique complémentaire est nécessaire, nous présentons dans le Chapitre 6 les résultats statistiques obtenus à l'aide des données de la mission CLUSTER.

II.5 Bilan

Dans cette partie on a pu voir les différentes signatures des émissions électrostatiques dans la magnétosphère. Ces ondes ont été étudiées par différentes missions et des classifications basées sur ces formes spectrales et sur des considérations théoriques ont été posées. Le mécanisme de génération de ces ondes est souvent associé à des fonctions de distribution instables avec des rapports de population chaud/froid différents. Un des intérêts de l'étude de ces ondes est leur possible implication dans les aurores diffuses, et nous avons pu voir que différentes réponses à cette question existent selon les conditions d'observation.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la fois aux formes spectrales des ondes électrostatiques, et aux fonctions de distribution des particules observées simultanément. Pour cela nous étudions les données des instruments WHISPER et PEACE, de la mission CLUSTER lors du passage au périhélie. L'orbite de CLUSTER est parfaitement adaptée à cette étude. L'équateur magnétique est traversé sans ambiguïté lors du passage au périhélie et l'étude statistique sur une année complète permet de couvrir de façon égale tous les secteurs MLT. Ces observations sont reliées aux classifications existantes, nous verrons aussi des types d'émissions naturelles qui n'ont jamais été observées auparavant.

Concernant le mécanisme de génération nous présentons les données particules dans la région équatoriale afin de voir les signatures sur les fonctions de distribution. Enfin, concernant la question des aurores diffuses, nous considérons l'intensité de la première bande autour de $3/2 f_{ce}$ et calculons les occurrences d'événements intenses.

Partie 2

Données étudiées et moyens d'étude

Dans cette partie, nous présentons les données et moyens d'étude à notre disposition pour analyser les ondes dans la région équatoriale de la plasmasphère.

Nous commençons, dans le Chapitre 3, par présenter la mission CLUSTER ainsi que les instruments utilisés dans ce travail.

Nous présentons ensuite les différentes techniques utilisées pour le traitement des données dans le Chapitre 4.

Données étudiées

Cette thèse s'appuie en grande partie sur l'analyse des données de la mission CLUSTER. Nous présentons dans ce chapitre le projet CLUSTER et les instruments utilisés au cours de cette étude.

III.1 La mission CLUSTER

Le projet CLUSTER a été proposé en 1983 dans le cadre de l'agence spatiale européenne (ESA pour European Space Agency). Il a été accepté en Février 1986 comme élément du programme Solar Terrestrial Science Program (STSP). Cette mission innove par le fait d'être composée de quatre satellites dans une configuration tétraédrique, ce qui permet d'une part une étude à trois dimensions de la magnétosphère terrestre et du vent solaire, et d'autre part de séparer les variations temporelles des variations spatiales (Escoubet et al., 1997). Après l'échec de lancement dû à l'explosion en vol de la fusée Ariane 5 en juin 1996, il a été décidé de reconstruire les satellites à l'identique. Le deuxième lancement a eu lieu durant l'été 2000 ; les quatre satellites ont été mis en orbite terrestre deux par deux par des fusées Soyouz - Fregat à partir du cosmodrome de Baïkounour (Figure 3.1). Le traitement scientifique des données a débuté en Février 2001 après une période de mise en route de six mois.



Figure 3.1: Lancement de deux des satellites CLUSTER par la fusée Soyouz le 9 Août 2000 (d'après ESA, www.esa.int).

Les quatre satellites CLUSTER ont des charges scientifiques identiques constituées de onze instruments mesurant les champs, les particules et les ondes avec une haute résolution temporelle. Leur orbite est polaire avec un apogée à 19.6 Rt et un périégée de 4 Rt, ce qui permet d'étudier les caractéristiques de régions très diverses allant du vent solaire à la queue de la magnétosphère. Toutes ces régions ont précédemment été explorées lors de missions comportant un seul satellite (GEOS, FAST, POLAR...) ou une paire de satellites (ISEE, CREES) et ne permettaient donc pas, ou seulement de façon qualitative de séparer les effets spatiaux des effets temporels des phénomènes étudiés, ce qui est la principale innovation de la mission CLUSTER.

III.2 Orbitographie et distance de séparation des satellites

La grande variété des plasmas présents dans les différentes régions de la magnétosphère nécessite une distance de séparation variable entre les satellites afin d'optimiser l'étude des phénomènes à différentes échelles. Durant les 9 années actuellement prévues maintenant pour cette mission (extension jusque fin 2009), cette distance de séparation varie entre 100 et 20000 km et selon un rythme d'une modification tous les 6 ou 12 mois (Figure 3.2).

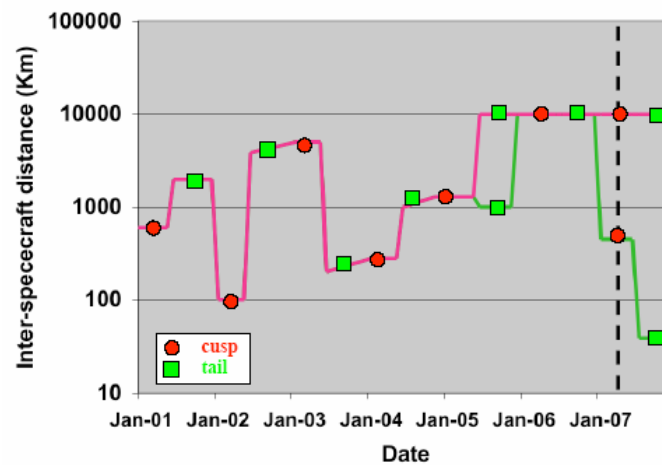


Figure 3.2: Distance de séparation moyenne entre les quatre satellites CLUSTER. Certaines phases de la mission sont explorées en utilisant une configuration dite ‘multi-échelles’, la configuration de base est un triangle de côté indiqué par la courbe rouge, les deux satellites, C3 et C4, étant séparés par la distance indiquée par la courbe verte (d’après ESA, www.esa.int).

Pour des distances inter-satellites faibles, il est possible d’estimer les gradients spatiaux tel que le gradient de densité, notamment dans la région de la plasmasphère (Darrouzet et al., 2006b).

On peut aussi noter que la forme du tétraèdre varie le long de l’orbite, celui-ci est en général régulier dans la région du cornet polaire pour une orbite avec apogée côté jour et allongé au périgée lors de la traversée de la plasmasphère (Figure 3.3). Par ailleurs, du fait de la révolution de la Terre autour du soleil, et du caractère inertiel et elliptique de l’orbite des satellites, ceux-ci vont traverser sur une période d’un an tous les temps magnétiques locaux lors du passage au périgée.

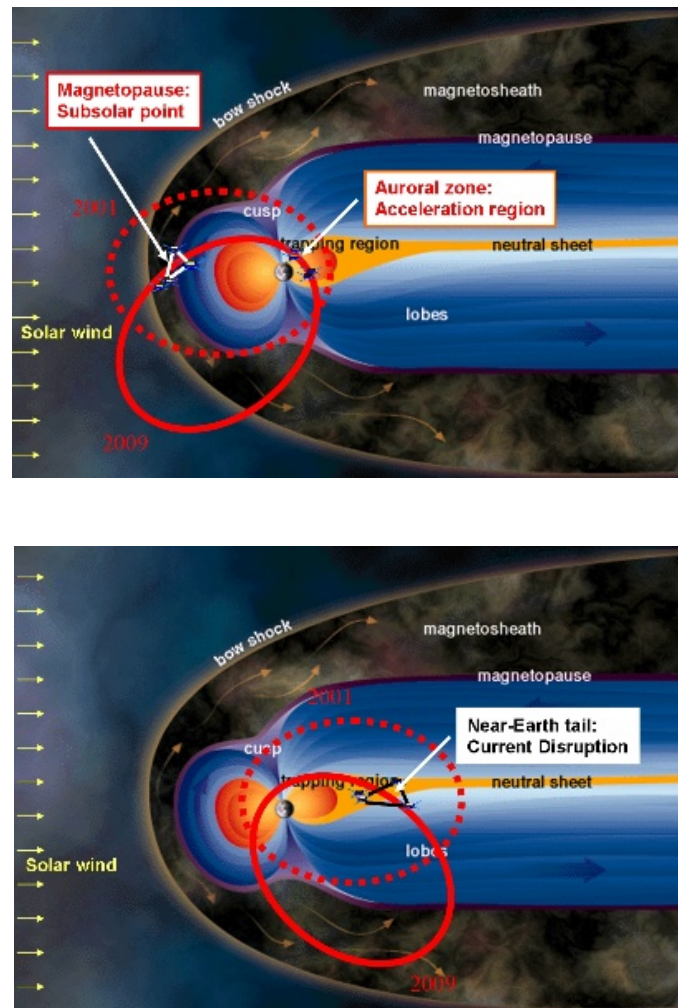


Figure 3.3: Coupe de la magnétosphère et orbites de CLUSTER en pointillés orbite nominale, et en trait plein orbite prévue pour la fin de mission (d'après ESA www.esa.int).

Cette particularité de l'orbite de CLUSTER va entre autres permettre d'étudier les ondes dans la plasmasphère lors du passage au périégée, et de faire des études statistiques non biaisées sur la localisation en secteur temps magnétique local.

III.3 Instruments embarqués à bord

Les quatre satellites CLUSTER appelés respectivement Rumba (C1), Salsa (C2), Samba (C3) et Tango (C4) sont de forme cylindrique de 1.3 m de hauteur et de 2.9 m de largeur, ils sont équipés de onze instruments (Figure 3.4, Figure 3.5, Figure 3.6).

La figure 3. 4, montre les 5 instruments du consortium ondes WEC (Wave Experiment Consortium, Pedersen et al., 1997) qui ont été regroupés pour optimiser le volume de données transmises par télémétrie.

Sur la Figure 3.5 sont représentés les instruments particules qui mesurent les flux d'électrons avec d'énergies allant de 10 eV à 400 et les flux d'ions avec des énergies allant de 0-4000 keV.

Enfin sur la Figure 3.6, on peut voir les trois autres instruments, notamment le magnétomètre FGM qui mesure le champ magnétique continu et l'instrument ASPOC qui contrôle le potentiel du satellite.

Les fonctions principales ainsi que les principaux investigateurs de ces instruments sont résumés dans le tableau 3.1. Il apparaît que cette mission a fait l'objet d'une collaboration mondiale élargie. Trois de ces instruments ont un investigateur principal français et ont été financées par le CNES et l'ESA.

Après avoir présenté de façon générale les instruments embarqués à bord des satellites CLUSTER, nous allons voir en détail les instruments qui ont fournis les données utilisées dans ce travail ; l'instrument WHISPER pour les données ondes à hautes fréquence ; l'instrument PEACE pour les données électrons et l'instrument EFW pour obtenir les densités hors de la gamme de fréquence de WHISPER. Nous utilisons aussi l'instrument FGM pour déterminer la gyrofréquence électronique lors de la traversée de l'équateur magnétique et l'instrument STAFF pour étudier les ondes à basse fréquence.

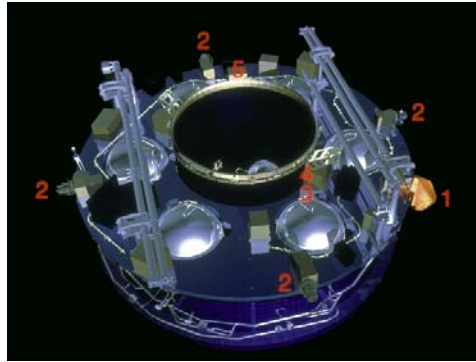


Figure 3.4: Positionnement des instruments ondes sur l'un des satellites CLUSTER: 1 STAFF (Fluctuations magnétiques et électriques) 2 EFW (Champ électrique et ondes) 3 DWP (Processeur des expériences ondes) 4 WHISPER (Densité électronique et ondes de plasma) 5 WBD (Formes d'onde du champ électrique). (d'après ESA www.esa.int)



Figure 3.5: Positionnement d'un deuxième groupe d'instruments sur l'un des satellites CLUSTER, les analyseurs de particules: 1 PEACE (Distributions des électrons) 2 CIS (Distributions des ions) 3 RAPID (Electrons et ions de haute énergie). (d'après ESA www.esa.int)

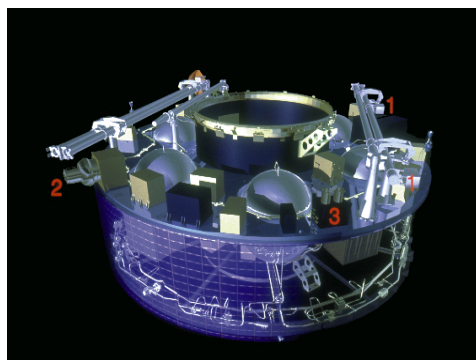


Figure 3.6: Positionnement d'un troisième groupe d'instruments sur l'un des satellites CLUSTER (D'après ESA): 1 FGM (Champ magnétique), 2 EDI (Vitesse de dérive des électrons) 3 ASPOC (Contrôle du potentiel du satellite). (d'après ESA www.esa.int)

Instrument	Fonction principale	Investigateur principal
DWP (Digital Wave Processing)	Coordination des mesures du consortium WEC. (Figure 3. 4, n° 3) [Woolliscroft et al., 1997]	H. Alleyne (Sheffield U, G B)
WHISPER (Wave of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation)	Mesure de l'activité naturelle des ondes hautes fréquences et mesure des paramètres du plasma. (Figure 3.4, n° 4) [Décréau et al., 1997]	P. Décréau, puis J-G.Trotignon (LPCE, France)
WBD (Wide Band Data)	Mesure haute résolution du champ électrique et magnétique. (Figure 3.4, n° 5) [Gurnett et al., 1997]	D. Gurnett puis J. Pickett (IOWA U, USA)
STAFF (Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation experiment)	Mesure des fluctuations du champ magnétique et des ondes basses et moyennes fréquences (0.1 Hz à 4 kHz). (Figure 3.4, n° 1) [Cornilleau-Wehrin et al., 1997]	N. Cornilleau-Wehrin (CETP, France)
EFW (Electric Field and Wave) Experiment	Mesure du champ électrique. (Figure 3.4, n° 2) [Gustafsson et al., 1997]	G. Gustafsson puis M. André (IRFU, Sweden)
FGM (FluxGate Magnetometer)	Mesure du champ magnétique continu tout au long de l'orbite. (Figure 3.6, n° 1) [Balogh et al., 1997]	A. Balogh, puis E. Lucek (IC, U.K.)
EDI (Electron Drift Instrument)	Détermination de l'intensité du champ électrique à partir de la dérive de faisceaux d'électrons monoénergétiques émis et reçus par l'instrument EDI (Figure 3.6, n° 2) [Paschmann et al., 1997]	G. Paschmann (MPE, Germany) puis R. Torbert, New Hampshire U, USA
ASPOC (Active Spacecraft POtential Control)	Neutralisation de la charge électrique du satellite par émission d'un faisceau d'ions. (Figure 3.6, n° 3) [Riedler et al., 1997]	W. Riedler puis K. Torkar (IWF, Austria)
CIS (CLUSTER Ion Spectrometry)	Mesure du flux d'ions de basse et moyenne énergies (0- 40 keV/q) (Figure 3.5, n° 2) [Rème et al., 1997]	H. Rème puis I. Dandouras (CESR, France)
PEACE (Plasma Electron And Current Experiment)	Mesure du flux d'électrons de basse et moyenne énergies (~0 à 30 keV) (Figure 3.5, n° 1) [Johnstone et al., 1997]	A. Fazakerley (MSSL, U.K.)
RAPID (Research with Adaptive Particle Imaging Detectors)	Mesure des particules de hautes énergies (électrons : 20-400 keV et ions : 10-4000 keV/q). (Figure 2.6, n° 3) [Wilken et al., 1997]	B. Wilken puis P. Daly (MPA, Germany)

Tableau 3.1: Instruments à bord des satellites CLUSTER et principaux investigateurs associés.

III.3.1 L'instrument WHISPER

L'instrument WHISPER est l'un des cinq instruments du consortium ondes, il mesure l'intensité du champ électrique (mesurée en $V_{rms}.Hz^{-1/2}$) sur la gamme de fréquences 2-80 kHz sous deux modes de fonctionnement : un mode actif qui sonde le milieu environnant et excite les fréquences propres du plasma et un mode naturel où l'instrument enregistre le bruit naturel. La résolution en fréquence de l'instrument est de 163 Hz et la résolution en temps est de 2.2 secondes en mode de télémessure normal et de 0.3 secondes en mode rapide.

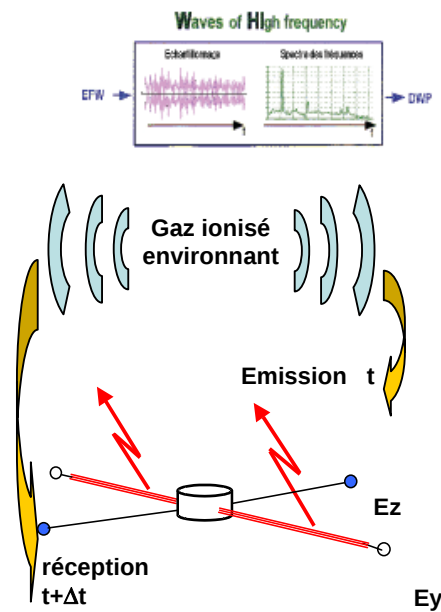


Figure 3.7: Croquis simplifié du fonctionnement de l'instrument WHISPER en mode actif

L'instrument WHISPER utilise les deux antennes 'double – sphère' de l'instrument EFW, longues de 88 m de bout en bout, qui se terminent à chaque extrémité par un capteur sphérique de 8 cm de diamètre. Les deux antennes tournent dans le plan X_{GSE}, Y_{GSE} (voir Annexe 1 pour la définition des systèmes de coordonnées) avec une période de rotation de 4 s environ.

L'instrument WHISPER comporte trois parties principales : un émetteur et un récepteur d'ondes et enfin un système d'acquisition et de traitement de données. Il utilise en réception l'antenne de EFW.

- L'antenne de réception mesure la différence de potentiel entre deux sphères d'une même antenne, on en déduit donc l'intensité du champ électrique.
- L'émetteur d'ondes, rattaché à la gaine de la deuxième antenne, est activé en mode sondeur. L'émetteur envoie un train d'ondes durant 1 ou 0.5 ms toutes les 52 secondes à différentes fréquences. Le récepteur connecté à l'autre antenne enregistre le signal reçu et le transmet à l'analyseur de spectre VSP (Vector Signal Processor). Le VSP effectue à bord une transformée de Fourier rapide du signal en 256 ou 512 points de fréquence.
- Le système d'acquisition et de traitement de données compresse et transmet les résultats de la transformée de Fourier. Les contraintes des télémesures vont donc imposer une compression des spectres à bord. Sur les 300 spectres accumulés durant une rotation seuls 2 spectres sont transmis au sol en mode standard.

La visualisation des mesures se fait à travers des spectrogrammes temps/fréquence. L'intensité du champ électrique y est exprimée en $V_{rms}.Hz^{-1/2}$. Cette quantité, la différence de potentiel entre capteurs de réception, résulte directement de la mesure. Elle permet d'atteindre la valeur du champ électrique. Elle représente en effet la densité spectrale du champ électrique intégrée le long de la longueur efficace des antennes, L_{eff} . Cette dernière, qui est classiquement considérée comme étant la longueur de bout en bout de l'antenne de réception (soit 88 m), varie en réalité en fonction du régime de plasma considéré et de la gamme de fréquence analysée (Beghin et al., 2005). La connaissance de la longueur efficace d'antenne est nécessaire pour convertir les intensités mesurées en $V_{rms}.Hz^{-1/2}$ en valeurs de champ électrique, usuellement exprimées en $V.m^{-1}$ lorsque l'on s'intéresse à l'amplitude d'un signal monochromatique. La conversion pour un champ électrique sinusoïdal d'énergie équivalente s'écrit:

$$E_{sin e}(V.m^{-1}) = \frac{\sqrt{\Delta F(Hz)}}{L_{eff}(m)} S(V_{rms}.Hz^{-1/2}). \quad \text{Eq 3.1}$$

Lorsque la longueur L_{eff} est considérée comme étant égale à 88 m (longueur des antennes « à vide »), la valeur du champ électrique est sous estimée (l'ordre de grandeur de L_{eff} étant 50 m). Nous allons nous servir dans le Chapitre 6 d'une conversion plus précise dans le cadre d'études statistiques sur l'intensité des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Nous présenterons différents moyens de traiter les données de l'instrument WHISPER dans le Chapitre 4 partie 4.2 et 4.3, notamment des méthodes de traitement d'image

utilisées pour la détermination des fréquences propres et la méthode de modulation pour déterminer l'orientation d'une onde par rapport à $\mathbf{B}$.

III.3.2 L'instrument EFW

L'instrument EFW (Gustafsson et al., 1997) est destiné à mesurer le champ électrique ainsi que le potentiel du satellite V_{sc} . Il est composé de deux paires de sondes sphériques en carbone vitreux liées au satellite par une antenne filaire d'une longueur de 42.5 m. La mesure du potentiel du satellite peut se faire en calculant la différence de potentiel entre les sondes et le corps du satellite.

Le potentiel du satellite dépend des paramètres du plasma environnant, densité température du plasma. Les fluctuations du potentiel des sondes vont donc refléter les fluctuations de ces deux paramètres. Une relation empirique non linéaire (Laakso et Pedersen, 1998 ; Moullard et al. 2002) relie le potentiel du satellite à la densité, en calibrant celle-ci aux données densité de WHISPER, on peut avoir une bonne estimation de la densité. Dans cette thèse, nous utiliserons les données densité fournies par l'instrument EFW dans le cas où celles-ci n'entrent pas dans la gamme de mesure couverte par WHISPER ($>80\text{kHz}$).

III.3.3 L'instrument PEACE

L'instrument PEACE a été élaboré au Mullard Space Science Laboratory (MSSL). Son but est la mesure en trois dimensions de la fonction de distribution des vitesses des électrons. Les mesures se font avec une bonne résolution temporelle, en temps, en énergie et en angle d'attaque (Johnstone et al., 1997). L'instrument PEACE est constitué de deux analyseurs électrostatiques de forme hémisphérique. Le premier, nommé LEEA (Low Energy Electron Analyser), est dédié aux électrons de basse énergie. Le second analyseur, nommé HEEA (High Energy Electron Analyser), couvre les hautes énergies. Les deux détecteurs sont positionnés de part et d'autre du satellite (Figure 3.8).

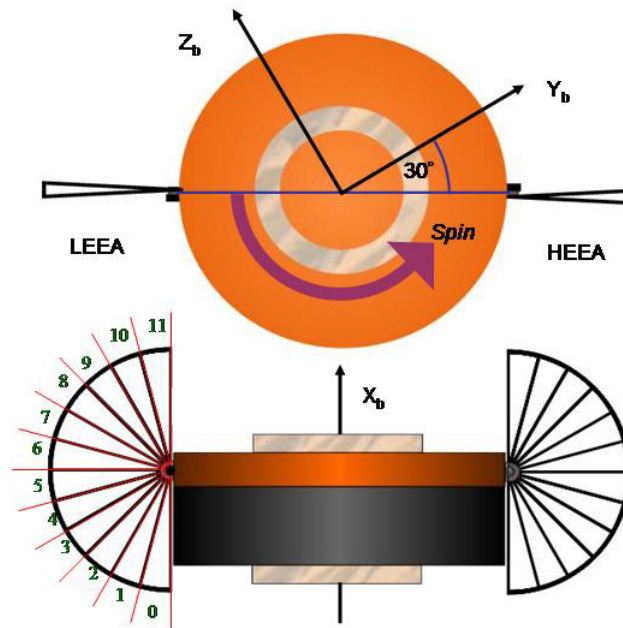


Figure 3.8: Schéma d'implantation des analyseurs électroniques HEEA et LEEA de l'expérience PEACE à bord de CLUSTER.

Les analyseurs effectuent un balayage en énergie de 26.5 keV à ~0 eV.

Du fait de la géométrie des deux senseurs, LEEA est plus adapté pour mesurer les flux intenses des électrons de basse énergie tandis qu'HEEA est plus sensible aux flux d'électrons de haute énergies.

Comme indiqué sur la Figure 3.8, les analyseurs ont un champ de vue polaire de 180° par rapport à l'axe de rotation et chaque senseur est composé de 12 détecteurs couvrant chacun 15° . La couverture azimutale est assurée par la rotation du satellite qui s'effectue en 4 secondes. Dans le mode standard, la résolution azimutale est de 11.25° .

La gamme en énergie (Figure 3.9) s'étend de 0.6 eV à 26.5 keV, les pas en énergie sont linéaires dans la gamme 0.6-10.7 eV (16 niveaux) puis logarithmiques jusqu'à 26.5 keV, pour un total de 88 niveaux.

En mode standard, l'analyseur LEEA couvre la gamme d'énergie 0.6 eV-1.2 keV suivant 30 niveaux, tandis que HEEA couvre la gamme d'énergie 34 eV-26.5 keV sur 30 niveaux.

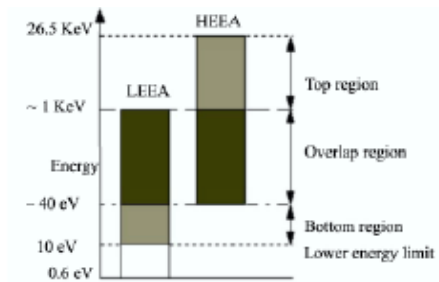


Figure 3.9: Gammes d'énergie couvertes par l'instrument PEACE en mode standard (d'après Johnstone et al., 1997).

La quantité de données transmise au sol va dépendre du mode de fonctionnement choisi et du débit de télémétrie. Pour le mode normal, un débit de 1257 octets / spin est alloué. Les données transmises sont généralement :

- Les moments calculés à bord (densité, vitesse, tenseur de pression, températures et flux de chaleur des électrons),
- Les flux mesurés dans le secteur azimutal contenant la direction du champ magnétique, et
- La distribution 3D des flux avec une résolution en angle et en énergie réduite pour des énergies en dessous de 10 eV.

Dans cette thèse nous utilisons principalement les fonctions de distribution électroniques données par le produit PAD (Pitch Angle Distribution). PAD donne une coupe 2D des flux dans le plan contenant la direction du champ magnétique $\mathbf{B}$ et l'axe de rotation du satellite.

III.3.4 L'instrument FGM

Dans le cadre de notre travail, il est important de connaître avec précision le champ magnétique le long de l'orbite du satellite. En effet, la mesure du champ magnétique aide à la détermination précise de la traversée de l'équateur magnétique, qui correspond au minimum du champ magnétique $\mathbf{B}$. Le champ magnétique est mesuré à bord des satellites CLUSTER à l'aide de l'instrument FGM (Flux Gate Magnetometer) décrit en détail par Balogh et al., (1997). Cet instrument mesure les trois composantes du champ magnétique avec une haute résolution temporelle. Il est constitué de deux

magnétomètres « flux gate » triaxiaux et d'une unité de traitement du signal. Les magnétomètres sont fixés à 3.2 m et 4.7 m respectivement du corps du satellite afin de minimiser les perturbations dues à ce dernier. L'instrument FGM possède une bonne résolution, il peut mesurer des champs allant de 3 nT (dans le vent solaire) à 1000 nT dans la magnétosphère interne. Cinq gammes d'intensité différentes sont utilisées et sa résolution varie de $7.8 \cdot 10^{-3}$ à 8 nT. Sa résolution temporelle, est constante, et est de 4.96 ms à bord. A cause des contraintes de télémesure, la valeur du vecteur $\mathbf{B}$ n'est transmise qu'à une fréquence de 25 ou 60 Hz. Par ailleurs, la communauté CLUSTER a systématiquement accès au flux de données à 4 s de résolution via les PPDB (Primary Parameters Data Base). Nous avons systématiquement utilisé dans ce manuscrit ces valeurs interpolées aux temps de spectres WHISPER.

III.3.5 L'instrument STAFF

Nous avons utilisé les données de l'instrument STAFF (Spatio Temporal Analysis of Field Fluctuation) pour étudier les ondes à basse fréquence. Cet instrument est destiné à l'analyse spatio temporelle des fluctuations des champs magnétiques et électriques (Cornilleau-Wehrlin et al., 1997).

L'expérience comporte un capteur à trois dimensions de type « search coil » pour la mesure des fluctuations magnétiques allant de 0.1 à 4kHz, un analyseur de forme d'onde et un analyseur spectral. Les signaux correspondants sont, soit transmis en forme d'onde, soit traités par l'analyseur.

Le senseur magnétique est un senseur tri-axial à contre réaction de flux monté sur un bras de 5 mètres de long, sa sensibilité est de $5 \cdot 10^{-3} \text{ nT.Hz}^{-1/2}$ à 1 Hz et de $4 \cdot 10^{-5} \text{ nT.Hz}^{-1/2}$ à 100 Hz et à 4 kHz.

La mesure des formes d'onde se fait avec une fréquence allant de 10 à 180 Hz selon le mode de télémesure avec une dynamique de 96 dB.

L'analyseur de spectre fournit des spectres jusqu'à 4 kHz en trois bandes :

- Bande A 8-64 Hz,
- Bande B 64-512 Hz, et
- Bande C 512-4000 Hz.

La résolution temporelle varie en fonction du mode choisi allant respectivement de 125 ms à 1 seconde et de 1 à 4 secondes. La dynamique est de 96 dB. Pour plus de détails se reporter à Cornilleau-Wehrin et al., (1997, 2001).

Moyens d'études

Après avoir vu les différents types de données disponibles, nous allons détailler les principaux moyens d'étude mis en œuvre pour traiter les données ondes. Nous présenterons tout d'abord les données caractéristiques de WHISPER dans la plasmasphère. Nous montrerons en particulier comment les fréquences propres du plasma sont déterminées expérimentalement.

Nous détaillerons ensuite le principe de la méthode des maxima d'intensité, qui est utilisée pour déterminer les caractéristiques spectrales d'une émission. Nous présentons notamment l'algorithme qui sera utilisé pour la détection automatique des émissions équatoriales.

Nous expliquerons par ailleurs la méthode de la directivité qui permet de définir la direction de propagation d'une onde à l'aide des propriétés de rotation des antennes d'EFW utilisées par WHISPER.

IV.1 Fréquences caractéristiques

Les données de l'instrument WHISPER sont généralement sous la forme de spectrogrammes temps fréquence. Sur la Figure 4.1, nous pouvons voir un spectrogramme présentant les ondes naturelles du milieu enregistrées par l'instrument en mode passif (Figure 4.1a) et les fréquences excitées par l'instrument en mode actif (Figure 4.1b). Un spectre à 07:02 TU est également représenté Figure 4.1c. Ces mesures sont effectuées lors de la traversée de la plasmasphère du 19 juillet 2003.

Nous pouvons voir sur la Figure 4.3d l'orbite des satellites qui traversent les régions de champ magnétique de type dipolaire lors du passage au périégée du 19 juillet 2003.

Les coordonnées du satellite sont données dans le système de coordonnées SM (Solar Magnetic coordinates) qui sera adopté tout au long de ce manuscrit (pour la définition des systèmes de coordonnées voir annexe 1).

La plasmasphère est traversée entre 06:00 et 08:00 TU, à 15 MLT, et entre -44° et 49° de latitude magnétique.

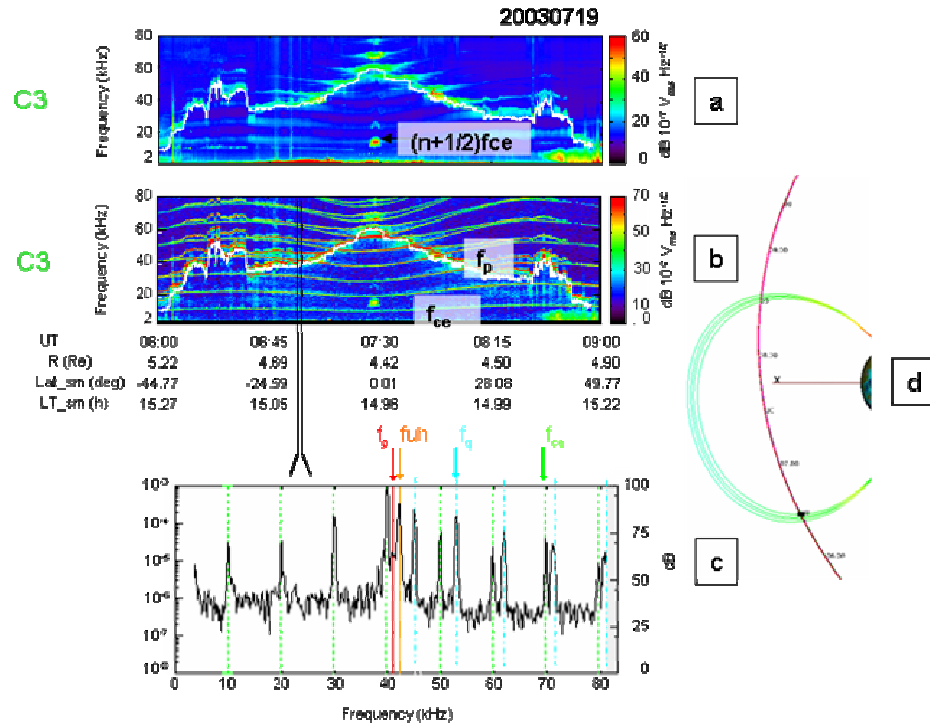


Figure 4.1 : Spectrogrammes temps fréquence pour la traversée de plasmasphère du 19 juillet 2003. Panneau a : Spectrogramme des ondes naturelles. Panneau b : Spectrogramme actif. Panneau c : Spectre actif à 07:02 TU. Panneau d : Orbitographie des satellites.

Sur le spectrogramme en mode actif (Figure 4.1b), ainsi que sur le spectre intensité fréquence (Figure 4.1c), nous pouvons voir la fréquence plasma (f_{pe}), la gyrofréquence électronique (f_{ce}) et ses harmoniques, les fréquences des modes de Bernstein (f_{qn}) ainsi que la fréquence hybride haute (f_{uh}). Pour les définitions de ces différents modes, voir l'annexe 2.

Nous pouvons noter l'augmentation de la fréquence plasma, représentée par la ligne blanche sur les spectrogrammes, jusqu'à la traversée de l'équateur magnétique puis la diminution caractéristique de celle-ci. La variation de la fréquence plasma n'est pas « lisse », avec l'apparition de renflements de densité dans les hémisphères nord et sud, qui sont caractéristiques d'éléments de plasma détaché nommés « plumes » entre 06:00 et 06:45 TU par exemple dans l'hémisphère sud (Darrouzet et al., 2006a). Sur le spectrogramme (Figure 4.1b), nous pouvons également suivre la variation du champ magnétique B à travers l'évolution de la fréquence cyclotronique électronique et de ses harmoniques, avec le minimum caractéristique de la gyrofréquence électronique et donc du champ magnétique B , lors de la traversée de l'équateur magnétique.

Sur le spectrogramme naturel Figure 4.1a, nous pouvons voir les ondes naturelles qui apparaissent lors de la traversée de la plasmasphère, notamment le Chorus (Parrot et al., 2003) qui apparaît à des fréquences inférieures à la gyrofréquence électronique et sur des durées de plusieurs minutes. Nous pouvons aussi observer les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ (El Lemdani-Mazouz et al., 2007) sous la forme de « spots lumineux », entre deux gyroharmoniques électroniques, près de l'équateur magnétique autour de 07:30 TU. Une étude détaillée de ces ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ est présentée dans ce manuscrit.

Afin de caractériser ces ondes, nous avons besoin de déterminer avec précision les modes propres du plasma, notamment la fréquence plasma f_{pe} . Selon la région de la magnétosphère traversée cette détermination est plus ou moins aisée (Trotignon et al, 2001). Comme nous pouvons le constater sur le spectre Figure 4.1c, lors de la traversée de la plasmasphère, les fréquences de résonnance du plasma sont bien séparées. La détermination de la gyrofréquence électronique f_{ce} (en vert sur la Figure 4.1c), des fréquences de Bernstein f_{qn} (en bleu) et de la résonance hybride haute f_{uh} (en orange) vont permettre de déduire la fréquence plasma f_{pe} à travers la relation

$$f_{pe} = \sqrt{f_{uh}^2 - f_{ce}^2}.$$

La fréquence plasma peut aussi être déterminée en utilisant les valeurs des résonances de Bernstein f_{qn} , et leurs écarts successifs par rapport aux gyrofréquences électroniques. Comme on peut le voir sur la Figure 4.2, l'alignement des valeurs va

permettre la détermination de la fréquence plasma spectre à spectre. Cette méthode est utilisée avec les spectres actifs (Hamelin et al., 1978)

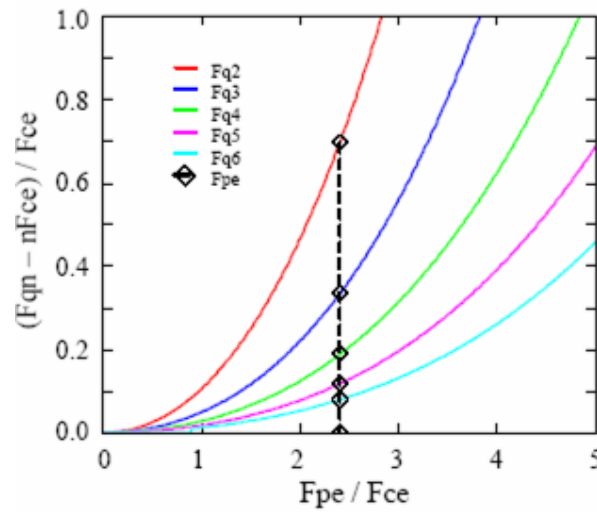


Figure 4. 2 : *Diagramme d'Hamelin.*

Afin de mettre à la disposition de la communauté CLUSTER des valeurs de densité sur une grande quantité de données, un traitement plus systématique est nécessaire. Cette détermination de la densité (reliée à la fréquence plasma) est basée en majorité sur des méthodes de traitement d'image (Rauch et al., 2006). Ces méthodes seront plus développées dans la partie IV.2.

IV.2 Méthodes de traitement d'image pour la détermination des modes propres du plasma

Dans cette partie, nous allons présenter quelques méthodes inspirées des techniques de traitement d'image pour déterminer les fréquences propres du plasma. Pour commencer, nous détaillerons les méthodes d'identification des fréquences de résonance. Nous passerons ensuite à la détection des ondes électrostatiques par la méthode des maxima d'intensité. Enfin, nous présenterons quelques algorithmes de détection automatique d'ondes naturelles observées dans la plasmasphère.

IV.2.1 Méthode d'identification des fréquences de résonance

Afin de positionner correctement les ondes naturelles par rapport aux fréquences caractéristiques du milieu (f_{pe} , f_{ce} , nf_{ce}), il nous faut identifier ces fréquences spectre à spectre. Il est fastidieux d'effectuer manuellement ce travail pour l'ensemble d'un spectrogramme et encore plus pour l'ensemble des traversées de la plasmasphère. Aussi, il était indispensable de mettre au point une méthode de détection automatique pour l'ensemble du spectrogramme. Les résonances doivent tout d'abord être déterminées, et ensuite nommées, c'est à dire de faire la différence entre la fréquence plasma, la gyrofréquence ou ses harmoniques et les modes de Bernstein. Pour effectuer ce travail délicat, nous avons considéré le spectrogramme comme une image sur laquelle nous appliquerons des traitements d'image adaptés aux données WHISPER.

Cette méthode de traitement d'image nécessite de sélectionner les pixels qui correspondent à des pics dans le domaine des fréquences. Pour une gamme d'amplitude donnée, nous allons créer, avec ces pixels, une série de nouvelles images de type points. Nous aurons donc autant d'images « points » que de nombre de pas d'amplitude. Parmi toutes ces images points et dans le cas idéal où les résonances ont la même amplitude, il existe une image qui contient toutes les résonances et ne contient aucun pic provenant du bruit. Cette image est facile à repérer automatiquement en regardant l'évolution du nombre de pixels par image au cours de la création. En effet, quand nous commençons à détecter les pics associés au bruit, le nombre de pixels devient vite très grand. Bien sûr, tout l'art de cette méthode consiste dans le choix du pas d'amplitude qui, dans notre cas, sera variable comme une fonction de l'amplitude. Cette méthode serait très efficace si les résonances avaient la même amplitude, ce qui est loin d'être la réalité. Nous sommes donc obligés d'effectuer un prétraitement pour essayer de ramener le plus possible les résonances à des niveaux d'amplitude comparables.

Tout d'abord, nous allons lisser légèrement chacun des spectres afin de minimiser les pics dus au bruit. Pour cela nous utiliserons une moyenne glissante qui a l'avantage de ne pas modifier la position des pics. De plus, nous avons une autre difficulté à résoudre. En effet, dans un spectre actif nous avons un comportement particulier dans la réponse du plasma, le niveau d'énergie est toujours beaucoup plus élevé autour de la fréquence plasma et ceci est d'autant plus vrai que la fréquence

hybride haute et la fréquence plasma sont proches ($f_{pe} \gg f_{ce}$). Ce phénomène amène donc des pics de bruit avec des amplitudes supérieures à l'amplitude de la gyrofréquence et de ses harmoniques. Pour supprimer cet effet, nous allons identifier le niveau de bruit de fond. Pour cela nous utiliserons une méthode de morphologie mathématique appelée TopHat.

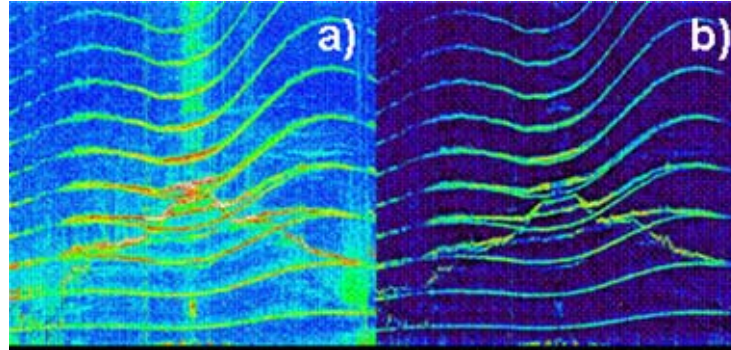


Figure 4.3 : Application de la morphologie TopHat sur un spectrogramme, a :) spectrogramme non travaillé, b :) spectrogramme travaillé.

Cette opération est appliquée sur le spectre. Nous définissons un segment horizontal en fréquence de dimension proche de la largeur des pics et à l'aide de ce segment nous effectuons une fermeture au sens de la morphologie mathématique en déplaçant cet élément sur la partie inférieure du spectre. Cette opération revient à garder la partie des pics qui rentre dans un chapeau haut de forme dont la dimension est celle de l'élément structurant. Cette opération permet de définir un niveau de fond qui sera soustrait au spectre. Ainsi, on ramène les pieds des pics sur une même ligne horizontale. De cette façon, l'augmentation d'énergie globale autour de la fréquence plasma est supprimée. Pour rendre encore plus efficace notre détection, nous allons également renforcer l'amplitude des résonances en utilisant la notion de continuité temporelle.

Dans la plasmasphère, les fréquences caractéristiques varient lentement et forment des lignes continues en fonction du temps. Pour faire apparaître ces lignes de façon plus évidentes, nous avons appliqué un filtre de Nagao. Ce filtre est utilisé en traitement d'images pour renforcer des traits sans modifier le contraste de l'image.

L'opération consiste à prendre un rectangle de pixels et à chercher une direction privilégiée et à mettre ensuite à la même valeur tous les pixels alignés dans cette direction. Dans notre cas, cela signifie que la résonance d'un spectre est amplifiée quand les mêmes résonances des spectres précédents et suivants sont fortes. Grâce à cette notion de continuité, nous améliorons de façon significative la détection automatique.

Après cette étape d'identification des résonances, il nous faut maintenant passer à l'étape dite de « segmentation », c'est-à-dire reconnaître ces résonances ou autrement dit les nommer. Pour résoudre ce problème, nous utilisons les propriétés de ces résonances. Pour la gyrofréquence et ses harmoniques, notre critère est simplement l'harmonicité. Pour rechercher les lignes harmoniques dans le spectrogramme, nous avons utilisé une méthode inspirée de méthodes classiques de recherche de droite dans une image (transformée de Hough). Cette transformée consiste à prendre dans le spectrogramme une série de segments harmoniques orientés dans une direction. On somme, pour chaque série, les valeurs des pixels en scannant toutes les directions et toutes les harmonicités. La série la plus énergétique sera la série harmonique de l'image, c'est-à-dire la gyrofréquence et ses harmoniques.

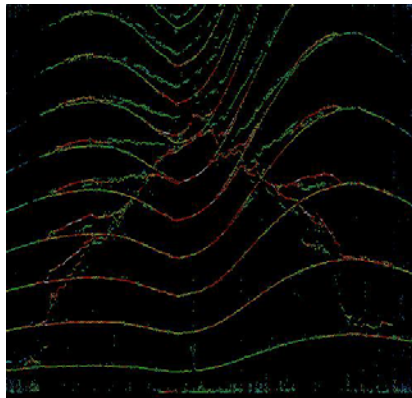


Figure 4.4 : *Image de spectrogramme retraité après segmentation*

Cette méthode a le mérite d'être extrêmement efficace et très robuste au bruit, mais a pour inconvénient son temps de calcul élevé.

Après avoir reconnu la gyrofréquence et ses harmoniques, nous les retirons de l'image pour ne pas perturber la recherche des modes de Bernstein. Pour les résonances

de Bernstein, nous utilisons la même méthode que précédemment mais à la place de l'harmonicité, nous introduisons la relation entre les différentes fréquences f_{qn} connue sous le nom de diagramme d'Hamelin, qui fait apparaître une pseudo harmonicité (voir Figure 4.2).

Enfin, connaissant la gyrofréquence et les modes de Bernstein, nous pouvons déduire la fréquence plasma et vérifier la valeur trouvée sur le spectrogramme. Pour les cas difficiles, nous pouvons également utiliser la méthode de la ligne la plus énergétique. Cette méthode consiste à prendre dans le spectrogramme deux valeurs de la fréquence plasma clairement identifiées et à chercher le chemin de plus forte énergie. Pour être efficace, cette méthode nécessite que les deux points identifiés ne soient pas trop éloignés l'un de l'autre.

IV.2.2 Méthodes des maxima d'intensité pour la détermination des ondes électrostatiques dans la plasmasphère

Afin de déterminer avec précision les caractéristiques en fréquence et en intensité des ondes mesurées par l'instrument WHISPER, la méthode de détection de fréquence des maxima d'intensité peut être appliquée (Rauch et al., 2006). Cette méthode est basée sur le principe de suivi temporel d'une même ligne d'intensité. Afin de détecter les maxima d'intensité, le spectrogramme temps-fréquence est traité en utilisant des méthodes de traitement d'image inspirées des techniques utilisées en photographie. Les spectres en temps sont examinés un à un, sur un intervalle de temps d'étude choisi.

Nous illustrons cette méthode dans le cadre de la détection des fréquences naturelles de la plasmasphère.

L'exemple choisi ici concerne la traversée de plasmasphère du 15 août 2002. Cette traversée a lieu de 07:03 et 10:00 TU entre -65 et 47 degrés de latitude magnétique, avec apparition d'ondes électrostatiques sur des latitudes magnétiques élevées sous forme de trois harmoniques.

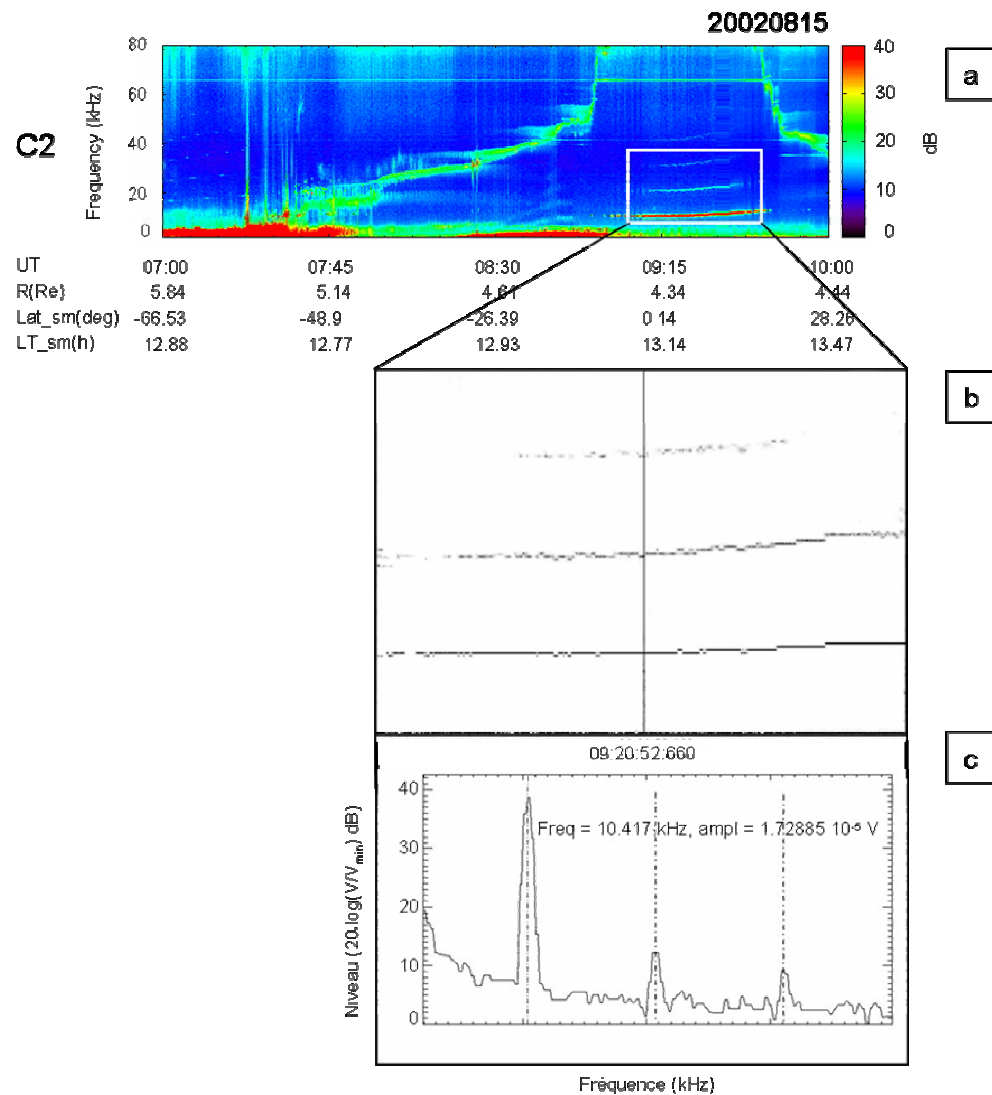


Figure 4.5 : a) Spectrogramme naturel des ondes mesurées par WHISPER avec l'intervalle d'étude surligné par le rectangle blanc, b) Spectrogramme retravaillé par la méthode des maxima d'intensité, c) Spectre à un instant choisi, et méthode de détection des maxima d'intensité.

La Figure 4.5 représente le spectrogramme temps-fréquence de traversée de la plasmasphère, le spectrogramme retravaillé sur l'intervalle de temps fréquence choisi (représenté par le carré blanc sur le spectrogramme), ainsi que le spectre choisi.

Sur chaque spectre, nous recherchons les maxima d'intensité (repéré par les droites en pointillés sur le spectre de la Figure 4.5c). Lorsqu'un maximum d'intensité

est détecté, un point caractérisé par une fréquence et une intensité donnée est positionné sur le spectrogramme recalculé (Figure 4.5b). La dynamique de couleur choisie donne la valeur de l'intensité normalisée à la dynamique du spectre mesuré sur tout le spectre. Afin de suivre précisément les fréquences d'une émission donnée, il faut suivre une ligne des maxima d'intensité de façon continue en temps. A un instant donné, ici 09:08 TU, les trois fréquences sont détectées autour de 10 kHz, 21 kHz, et 31 kHz. Sur le spectrogramme retravaillé, on peut voir sur la ligne correspondant au spectre choisi, les 3 points d'intensité différentes correspondant aux 3 fréquences détectées.

IV.2.3 Algorithmes de détection automatique dans la plasmasphère

Afin d'étudier de façon systématique les ondes observées dans la région de la plasmasphère, il est nécessaire de traiter une grande quantité de données pour ressortir leurs caractéristiques spectrale sur différents passages au périgée. Pour cela des algorithmes de détection automatique sont mis en œuvre, ceux-ci sont adaptés en fonction des caractéristiques des ondes observées. Ces outils sont développés au sein de notre laboratoire et sont principalement basés sur des méthodes de traitement d'image. Une première étape de traitement manuelle est cependant nécessaire avant de passer au traitement automatique.

L'étape manuelle, consiste à répertorier les données des passages au périgée sur trois années de données WHISPER et à définir en visualisant sur les spectrogrammes naturels : A savoir : les émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$, les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ et émissions aux nf_{ce} . Nous verrons plus loin, lors d'études d'événements, que ces émissions diffèrent par leurs caractéristiques spectrales et sont facilement reconnaissables sur les spectrogrammes. Pour chaque passage, nous avons ainsi répertorié la présence, ou l'absence des différents types d'émissions, et avons noté le temps approximatif de passage à l'équateur t_{eq} . Un listing de tous les passages au périgée a été créé, y sont notés les heures de début et de fin de chaque traversée, le temps approximatif de traversée de l'équateur magnétique, ainsi que les types d'émissions observées. Pour les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ le nombre d'harmoniques observées est aussi indiqué.

L'algorithme automatique de détection des émissions aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ proche de l'équateur magnétique est présenté avec plus de détails dans le Chapitre 6.

IV.2.3.a Principe de détection

Les émissions électrostatiques aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ sont caractérisées, comme on l'a vu dans le Chapitre 2, par leur confinement près de l'équateur magnétique (Christiansen et al., 1978 ; El-Lemdani Mazouz et al., 2007), ainsi que par leur intensité relativement élevée comparativement aux autres émissions observées (Roeder et Koons, 1989 ; Gough et al., 1979). Ces émissions apparaissent sous forme d'harmoniques entre deux gyrofréquences électroniques successives. Nous avons effectué une étude statistique couvrant trois années de données de WHISPER (Chapitre 6) afin de faire ressortir les propriétés de ces émissions. Vu le grand nombre de données à traiter, une procédure automatique était nécessaire avec une première étape manuelle comme préliminaire.

Les différentes étapes de l'algorithme de détection automatique des émissions à $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ sont résumées Figure 4.6.

Les résultats du traitement manuel sont utilisés comme paramètres d'entrée de l'algorithme de détection automatique. La lecture des dates et temps de traversée approximatif de l'équateur magnétique t_{eq} permet de définir un intervalle d'étude temporel de 10 mn autour de cet instant, et ce pour les traversées avec observation d'ondes aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$. Sur cet intervalle temporel, nous devons rechercher la présence de ces ondes. Pour cela il est nécessaire de connaître pour chaque spectre la valeur de la gyrofréquence électronique f_{ce} . Celle-ci est définie est directement obtenue à partir de la valeur du champ magnétique mesuré par l'instrument FGM (Balogh et al., 1997). La valeur de f_{ce} connue, nous pouvons appliquer un motif en fréquence et en temps centré autour de $1.5 f_{ce}$, de largeur $0.8 f_{ce}$ et de durée 10 mn autour de t_{eq} (voir Figure 4.7)

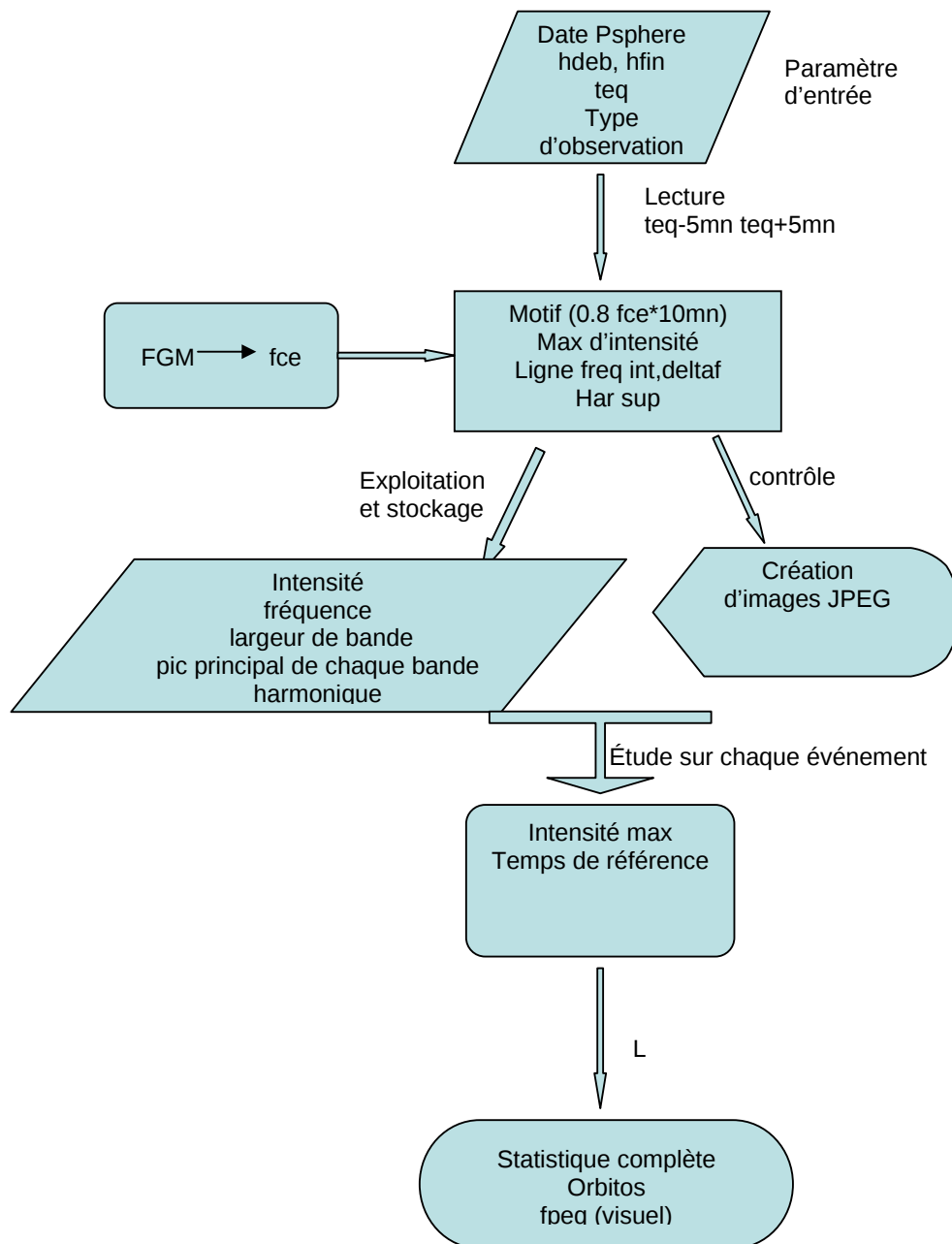


Figure 4.6 : Organigramme de l'algorithme de détection automatique utilisé pour la détection des émissions à $(n+1/2)f_{ce}$.

La méthode des maxima d'intensité sera appliquée à l'intérieur de cet intervalle: d'abord pour la première bande et ensuite pour les harmoniques supérieures (voir Figure 4.7). L'application de cette méthode va permettre de ressortir les caractéristiques

spectrales de chaque harmonique, la fréquence du pic principal, l'intensité et largeur de bande.

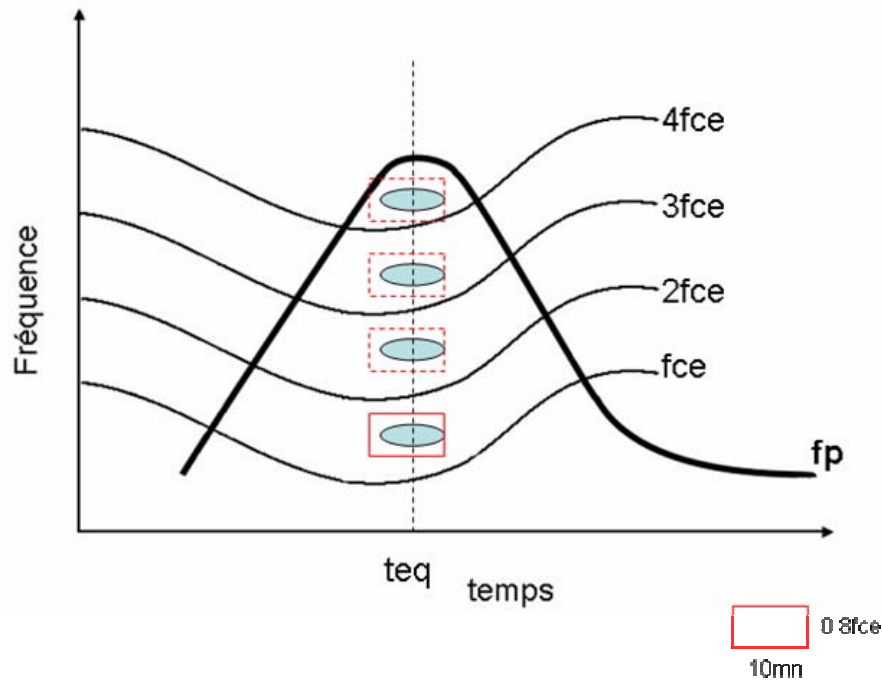


Figure 4. 7 : Schéma simplifié du principe de l'algorithme utilisé.

Afin de contrôler les résultats de l'algorithme, des images JPEG sont créés au fur et à mesure (voir Figure 4.8), sur lesquelles nous pouvons aisément vérifier si la détection des maxima d'intensité est bonne ou pas. Sur la partie gauche se trouve la partie du spectrogramme traitée, avec en blanc, la fréquence détectée, et en rouge et vert les bornes de fréquence supérieures et inférieures caractérisant la largeur à mi-hauteur. Sur le panneau b, on peut voir le résultat obtenu en appliquant la méthode des maxima d'intensité. Les panneaux c et d représentent respectivement l'énergie en code couleur sur toute la durée du spectrogramme et la variation temps fréquence de l'intensité sur le motif choisi. Sur l'exemple choisi, lors de la traversée du 30 juillet 2004, 7 harmoniques sont observées en dessous de f_{pe} . Il est possible de suivre la ligne des maxima d'intensité pour chaque harmonique (Figure 4.8a) sur tout l'intervalle d'observation. Les fréquence, largeur de bande et intensité pour chacune de ces harmoniques sont stockées dans des fichiers séparés pour chaque événement et pour chacune des harmoniques.

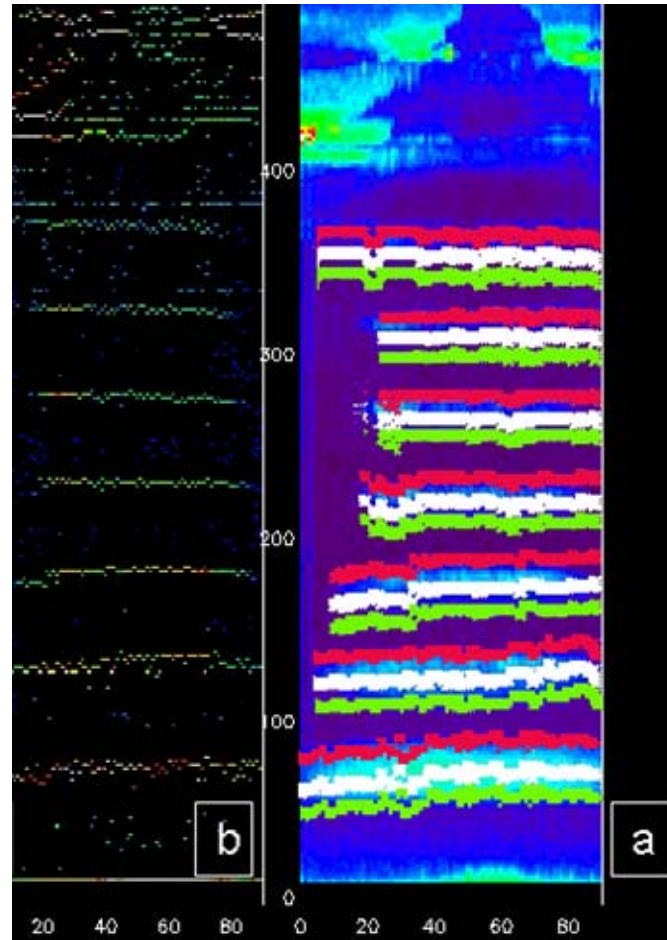


Figure 4.8: Résultats du traitement automatique. a):suivi des maxima d'intensité, les fréquences suivies sont représentées par les croix blanches, les croix rouges et vertes délimitent les limites supérieures et inférieures de l'intervalle. b): résultat de la méthode des maxima d'intensité.

IV.2.3.b Résultats et exploitation

Nous allons maintenant exploiter les résultats obtenus par la méthode des maxima d'intensité pour chaque traversée de plasmasphère.

Pour caractériser un événement, nous nous intéressons à la première harmonique observée. La lecture automatique de tous les fichiers stockés pour la première bande gyroharmonique va permettre de faire ressortir les instants où l'intensité observée est maximale t_{max} , cet instant va ainsi caractériser l'observation.

Un fichier regroupant toutes les observations avec l'instant du maximum d'intensité est créé et est utilisé pour déterminer les paramètres d'orbitographie correspondants.

Ce résultat final va servir pour notre étude statistique.

IV.3 Orientation par rapport au champ magnétique

Plusieurs modes propres peuvent apparaître dans un plasma magnétisé. La connaissance de l'orientation d'une onde à travers l'orientation de son vecteur d'onde $\vec{k}$ par rapport au champ magnétique $\mathbf{B}$ est une information importante qui peut aider à la reconnaissance d'un mode de propagation.

L'application de différents outils tels que l'outil ²« directivité » des ondes basé sur l'orientation du champ électrique, en utilisant les propriétés de rotation des antennes de WHSIPER, ou alors, le calcul de l'angle entre le maximum du champ électrique mesuré et $\mathbf{B}$, fournissent des informations sur le mode de propagation des ondes.

IV.3.1 Taux de modulation et directivité

Les satellites CLUSTER mesurent le champ électrique à l'aide de deux antennes perpendiculaires tournant dans le plan de spin (x_{GSE} , y_{GSE}), plan quasi parallèle au plan de l'écliptique (pour la définition des repères voir Annexe 1). Du fait de la rotation des antennes, la norme du champ électrique peut varier, allant d'une valeur minimale à sa valeur maximale.

Soit E_{xy} la projection de $\mathbf{E}$ dans le plan de spin

Pour une propagation dans le vide, le vecteur champ électrique $\mathbf{E}$ décrit une ellipse, qui peut être plus ou moins allongée. Cette propriété est aussi vérifiée dans les milieux plasma que nous étudions. Lorsque le vecteur d'onde $\vec{k}$ est perpendiculaire au plan contenant cette ellipse, on parle de mode ordinaire O et lorsqu'il est contenu dans ce plan, on parle de mode extraordinaire X. L'excentricité de l'ellipse peut changer, et pour les cas extrêmes, prendre la forme d'une droite ou d'un cercle, on parlera donc de polarisation linéaire, circulaire ou elliptique.

La mesure du champ électrique à une position angulaire donnée de l'antenne est une valeur moyennée sur un grand nombre de périodes du signal E .

En fonction de la polarisation du champ E , la modulation sera plus ou moins forte.

(voir Figure 4.9)

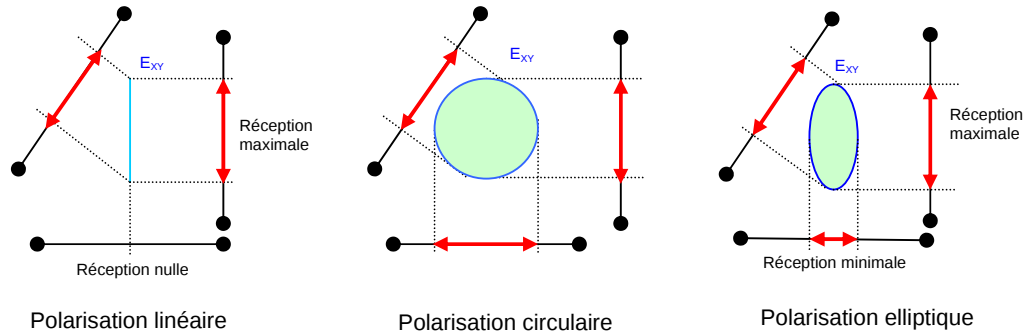


Figure 4. 9 : *Mesure de E_{xy} pour différentes positions de l'antenne, et pour différentes polarisations.*

- Si la polarisation du champ électrique est linéaire, la valeur mesurée par l'antenne sera nulle lorsque celle-ci est perpendiculaire à E_{xy} et maximale lorsqu'elle est parallèle à E_{xy} , dans ce cas l'écart entre les valeurs minimales et maximales mesuré est important et la modulation égale à 100%.
- Si la polarisation du champ électrique est circulaire, alors la valeur mesurée par l'antenne est constante et l'écart entre valeurs minimales et maximales mesurées est nul, et la modulation égale à 0%
- Enfin si la polarisation du champ électrique projeté dans le plan de spin est elliptique, alors la valeur minimale mesurée est non nulle.

L'écart des valeurs minimale et valeur maximale mesurées est d'autant plus grand que l'ellipse est allongée, le signal est alors très modulé si la polarisation se rapproche de la polarisation linéaire et est faiblement modulé si la polarisation est proche d'une polarisation circulaire. Dans cette thèse, nous calculons les taux de modulation sur les différents types d'observations dans la plasmasphère, bien que la durée des phénomènes observés ne permette pas toujours d'appliquer la méthode sur un grand nombre de spins.

IV.3.2 Calcul instantané de l'orientation par rapport à B

Un autre outil mis à notre disposition par l'équipe WHISPER permet de déterminer l'angle entre les antennes et le champ magnétique B de façon instantanée.

Les trois composantes du champ magnétique sont données par l'instrument FGM toutes les 4 secondes, et connaissant la position des antennes dans l'espace, il est possible de déterminer l'angle entre les antennes et le champ magnétique B .

Ces informations servent à déterminer l'orientation du champ électrique d'une onde observée par WHISPER par rapport au champ magnétique B .

Partie 3

Données ondes et particules dans la plasmasphère

Cette partie est consacrée à la caractérisation des données ondes et particules dans la région de la plasmasphère externe traversée par CLUSTER au périgée.

Le Chapitre 5 est consacré à la caractérisation spectrale des ondes observées lors d'études d'événement. Le Chapitre 6 est dédié à une étude plus systématique à travers une étude statistique des ondes observées sur 3 années de données WHISPER.

Le Chapitre 7 présente les signatures électroniques recueillies par l'instrument PEACE dans la région équatoriale de la plasmasphère.

Observation d'Ondes dans la Plasmasphère

Dans cette partie nous allons passer en revue les différents types d'ondes de haute fréquence observées par l'instrument WHISPER lors de la traversée de la plasmasphère. Cette région étant composée de plasma non collisionnel, l'échange d'énergie entre particules ne peut se faire qu'à travers les ondes.

Notre étude sera volontairement morphologique et permettra de séparer les émissions les unes des autres. Nous allons d'abord présenter les différents types d'émissions observées à travers des études d'événements, puis nous détaillerons les caractéristiques de chacune d'elles. La bonne résolution de l'instrument WHISPER a permis de faire ressortir les structures fines des émissions équatoriales observées et de mettre en évidence des émissions bien définies en fréquence situées à nf_{ce} , qui n'ont jamais été observées auparavant.

V.1 Observation d'ondes plasmasphériques

La Figure 5.1a représente le spectrogramme des émissions naturelles vues par l'instrument WHISPER à bord du satellite C4 lors d'une traversée typique de plasmasphère.

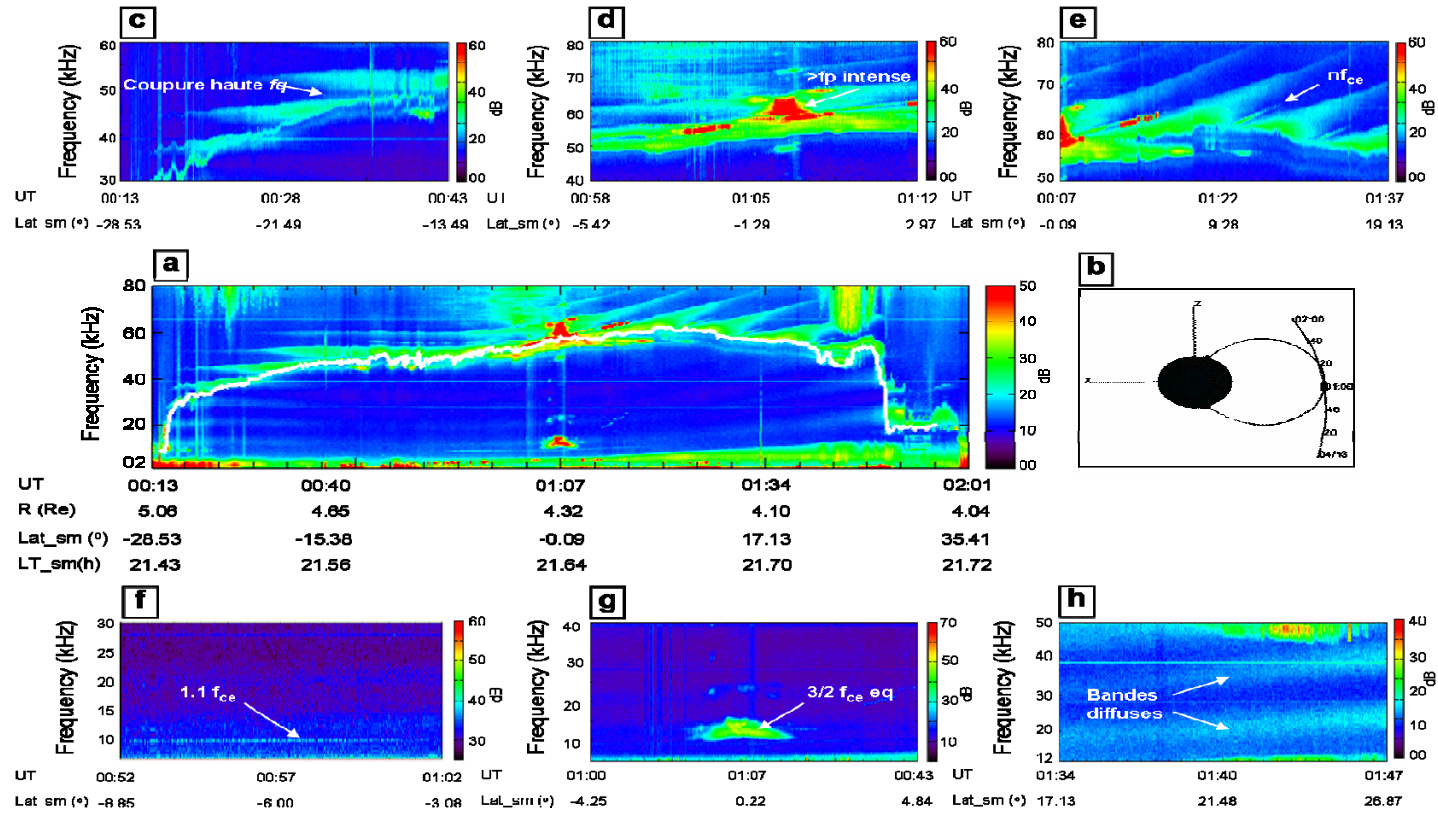


Figure 5.1: a) Spectrogramme temps fréquence lors de la traversée du 13 Avril 2004. Les paramètres d'orbitographie sont donnés en coordonnées SM.

b) Trajectoires des satellites sur la durée étudiée

c – d – e) Vue détaillée des différentes émissions observées, aux fréquences supérieures à la fréquence plasma

f – g – h) Vue détaillée des différentes émissions observées, aux fréquences inférieures à la fréquence plasma.

Comme l'orbitographie des satellites l'indique (Figure 5.1b), ceux-ci traversent les régions dipolaires entre 00h et 02h TU dans une configuration rapprochée. Les quatre satellites observent les mêmes émissions lors de cette traversée. Nous ne montrons ici que les données du satellite C4 car les données en mode naturel sur ce satellite ne sont pas perturbées par l'instrument actif EDI (Paschmann et al., 1997), qui ne fonctionne pas sur ce satellite.

Le spectrogramme de cette traversée de plasmasphère se présente sous la forme typique d'un « arbre de Noël » (émissions sous forme de branches entre gyroharmoniques). Les satellites traversent un domaine de latitudes allant de -28^0 à 35^0 dans le système de coordonnées SM, autour de 21h MLT. La fréquence plasma est représentée en blanc sur la Figure 5.1a. Nous pouvons remarquer les variations caractéristiques de celle-ci, atteignant la valeur maximale de 60 kHz à 01:07 TU lors de la traversée de l'équateur magnétique, puis sa diminution en allant vers la plasmathrough.

Plusieurs émissions naturelles sont observées lors de cette traversée. Une vue détaillée de chacune de ces émissions est représentée sur les panneaux c-h de la Figure 5.1. Des émissions électromagnétiques, telles que l'AKR (Auroral Kilometric Radiation) entre 00:23 TU et 01:43 TU sous forme d'ondes sporadiques de haute fréquence (ici > 60 kHz) ou alors le Continuum non thermique (NTC), observé ici entre 60-80 kHz, de 00:55 à 01:10 TU (Grimald et al., 2007). Cette observation est associée à des émissions très intenses au-delà de la fréquence hybride haute f_{uh} (voir Figure 5.1 d). A plus basse fréquence (ici < 6 kHz), nous pouvons observer du Chorus entre 00:30 TU et 02:10 TU (Parrot et al. 2003). Sont enfin observées des émissions reliées aux modes propres du plasma (f_p , f_{ce} , f_q) qui font l'objet d'une étude plus approfondie dans ce travail.

Pour commencer, nous allons détailler les observations qui se font au dessus de la fréquence plasma f_p . Comme on l'a vu, cette traversée de plasmasphère est sous la forme typique d'un « arbre de Noël ». Cette forme vient de la présence d'émissions naturelles sous forme de « branches », au dessus de la fréquence plasma. Ces émissions ont pour coupure haute les fréquences de Bernstein f_{qn} , et pour coupure basse une fréquence que nous appellerons f_{co} . Nous pouvons voir une vue détaillée de ces émissions sur le panneau c de la figure 5.1 ; celles-ci sont observées de part et d'autre de l'équateur magnétique jusqu'à des latitudes élevées. Leurs fréquences sont placées

ici entre 35 et 80 kHz. La variation des fréquences de coupure haute aux f_{qnn} est reliée à la variation de la fréquence plasma et peut constituer un moyen de diagnostic de celle-ci (Trotignon et al., 2006).

Un autre type d'émissions est observé au dessus de la fréquence plasma f_p sous la forme d'émissions intenses et au dessus de la fréquence hybride haute f_{uh} . Ces émissions sont limitées dans la partie haute fréquence par la fréquence du mode de Bernstein f_{qn} correspondant à l'harmonique contenant la fréquence hybride haute f_{uh} . Comme indiqué sur le spectrogramme de la Figure 5.1 et sur la vue détaillée du panneau d, celles-ci sont observées près de l'équateur magnétique et aussi à des latitudes plus élevées. L'intensité de ces ondes est ici supérieure d'un ordre de grandeur à l'intensité des ondes électrostatiques aux $(n+1/2) f_{ce}$ observées au dessous de la fréquence plasma avec une intensité de l'ordre de $4 \cdot 10^{-4} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$. Comme rappelé dans le Chapitre 2 ces ondes peuvent être à l'origine de continuum non thermique tel que suggéré par Kurth et al., (1979, 1981), Rönmark, (1985).

Enfin, nous remarquons la présence d'émissions monochromatiques, bien définies en fréquence, se situant systématiquement au dessus de la fréquence plasma f_p . Ces émissions se présentent sous la forme d'harmoniques et sont observées de part et d'autre de l'équateur magnétique. Quatre harmoniques sont observées dans l'hémisphère nord et une harmonique est observée dans l'hémisphère sud. Une de ces harmoniques (surlignée par la flèche blanche) est observée autour de 01:22 TU à une latitude de 9^0 et entre 62-65 kHz (voir Figure 5.1e). Connaissant la valeur de la gyrofréquence f_{ce} (donnée par l'instrument FGM, Balogh et al., 2001), nous remarquons que ces émissions se superposent exactement aux harmoniques de f_{ce} . Leur intensité est de l'ordre de $3.8 \cdot 10^{-6} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$. Ces émissions sont fortement modulées. Elles n'ont, à notre connaissance, jamais été observées auparavant, par contre elles ont été prédites par une théorie relativiste (Farrel, 2000). Nous verrons un peu plus en détail les caractéristiques de ces émissions à nf_{ce} dans la partie V.4. Une étude statistique sur l'occurrence de ces émissions sera présentée dans le Chapitre 6.

Les émissions observées en dessous de la fréquence plasma, f_p sont aussi reliées à la gyrofréquence f_{ce} , et sont en général observées entre deux gyrofréquences électroniques. Différentes formes spectrales apparaissent.

Tout d'abord des émissions à faible largeur de bande, cette fois-ci bien définies en fréquence (voir panneau f de la Figure 5.1), peuvent s'étendre sur les deux hémisphères. Nous voyons ici qu'elles apparaissent entre -8° et -3° de latitude magnétique, et entre 00:52 et 01:02 TU. Une seule harmonique est observée à une fréquence proche de 10 kHz: soit $1.1 f_{ce}$. L'intensité de cette émission est de l'ordre de $1.2 \cdot 10^{-6} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$. Ces émissions sont probablement reliées au type $3/2 f_{ce}$ étroits que nous avons décrites dans le Chapitre 2. Nous donnons plus de détails sur ces émissions dans la partie 5.3.

Un autre type d'émissions est observé à quelques degrés de latitude magnétique autour de 01 :07 TU sous forme de spot lumineux en dessous de la fréquence plasma f_p et entre 2 gyrofréquences électroniques successives (voir panneau g de la Figure 5.1). Ces émissions sont communément appelées $(n+1/2)f_{ce}$ du fait du positionnement en fréquence. Celles-ci se trouvent confinées à quelques degrés de latitude autour de l'équateur magnétique et se présentent sous forme d'harmoniques. Leur intensité est plus élevée que celle des émissions à $n(1.1)f_{ce}$. Elle est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-5} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$ pour la première harmonique qui est généralement la plus intense. Nous pouvons aussi noter le feuilletage de ces émissions équatoriales. Nous détaillerons leurs caractéristiques spectrales dans la partie 5. 2 .

Enfin nous citons les émissions qui apparaissent sous forme diffuse entre deux gyrofréquences électroniques successives (voir Figure 5.1g). L'intensité de ces émissions est faible de l'ordre de quelques $10^{-7} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$. Ces émissions sont observées entre 01:34 et 01:47 TU dans l'hémisphère nord et s'étendent à des latitudes magnétiques élevées comprises entre 17° et 27° de latitude magnétique. Elles sont aussi observée dans l'hémisphère sud entre 00:13 et 00:43 TU. Ces émissions ne sont pas bien définies en fréquence, d'où la dénomination de bandes diffuses. Comme on l'a vu dans le Chapitre 2, celle-ci sont probablement liées à la présence d'anisotropie de température (Ashour Abdalla et Kennel, 1978 a et b).

Nous nous intéressons plus particulièrement dans cette thèse aux ondes observées à nf_{ce} , qui ont été observées pour la première fois par l'instrument WHISPER, et aux ondes à $n(1.1) f_{ce}$ et $(n+1/2) f_{ce}$ observées en dessous de la fréquence plasma f_p .

Nous allons d'abord détailler les caractéristiques des émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$.

V.2 Emissions électrostatiques équatoriales

Les émissions électrostatiques équatoriales ont été observées par plusieurs missions, aussi bien dans la magnétosphère terrestre (voir par exemple Kennel et al., 1970 ; Roeder et Koons, 1989 et Christiansen et al., 1978) que dans les environnements d'autres planètes magnétisées (Kurth et Gurnett, 1991). Un des intérêts de l'étude de ces ondes, est leur possible rôle dans la précipitation des électrons dans le cône de perte, provoquant l'apparition d'aurores diffuses. Elles sont observées par WHISPER dans la région de la plasmasphère, et sont couramment appelées $(n+1/2)f_{ce}$ du fait de leur position en fréquence. En réalité, leurs fréquences peuvent aller de $(n+0.1)f_{ce}$ à $(n+0.9)f_{ce}$ (voir Chapitre 2). Ces émissions peuvent apparaître sous forme d'harmoniques successives. La bonne résolution de l'instrument WHISPER permet de déterminer les propriétés en fréquence, intensité, et largeur de bande des émissions électrostatiques.

Les caractéristiques spectrales de ces émissions seront tout d'abord présentées. Nous montrons ensuite que la structure en fréquence de ces émissions est complexe, et que des sous structures en fréquence peuvent apparaître. Nous mettons aussi en évidence l'influence de la fréquence plasma sur le nombre d'harmoniques observées à travers des études d'événements. Enfin, nous montrerons à travers une étude d'événement atypique que ces observations ne se situent pas toujours près de l'équateur magnétique.

V.2.1 Caractéristiques spectrales des émissions équatoriales

Nous allons illustrer à travers une étude d'événements les caractéristiques spectrales en fréquence, intensité et largeur de bande des émissions électrostatiques équatoriales. La structure feuilletée de ces émissions sera mise en évidence et nous allons adopter une terminologie qui sera conservée tout au long de ce manuscrit pour séparer les différents types d'émissions électrostatiques observées.

La Figure 5.2a représente le spectrogramme naturel du satellite 4 pendant la traversée typique de plasmasphère du 23 septembre 2003. Les quatre satellites sont en

configuration rapprochée (Figure 5.2b), et traversent la plasmasphère sur une durée de 3 heures autour de 10h MLT.

Comme nous pouvons le voir sur le spectrogramme, la fréquence plasma varie peu allant de 20 kHz au début de la traversée, (autour de 20:14 TU) à 40 kHz lors de la traversée de l'équateur magnétique autour de 21:36 TU. Cette variation indique que le satellite se trouve toujours à l'extérieur de la plasmasphère, et que celle-ci se trouve entre le satellite et la Terre, du fait de l'activité géomagnétique modérée ($K_p=3$).

La barre au dessus du spectrogramme (Figure 5.2a) indique la présence de saturations (overflow) qui créent des répliques sporadiques aux multiples de 10 kHz, (Vasilevitch., 2000). Celles-ci ne sont néanmoins pas gênantes dans la caractérisation des émissions équatoriales. En effet, tous les spectres affectés sont reconnaissables et il existe des spectres non affectés qui permettent de repérer les fréquences naturelles. Le spectre naturel représenté Figure 5.2c est un exemple de spectre non affecté par les répliques parasites. De plus, la continuité de la position en fréquence, entre deux spectres successifs, des ondes étudiées permet de caractériser ces ondes sans difficulté.

Des émissions diffuses sont présentes tout le long de la traversée entre -36° et 10° de latitude magnétique et entre deux gyrofréquences électroniques successives. Ces émissions appartiennent à la même classe que celles représentées Figure 5.1h et ne seront pas abordées dans cette thèse.

Un autre type d'émissions électrostatiques est observé près de l'équateur magnétique. Celles-ci apparaissent sous forme de « spots lumineux » en dessous de la fréquence plasma. Trois harmoniques sont observées avec des intensités de l'ordre de $6 \cdot 10^{-5} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$. Trois autres harmoniques d'intensité plus faible sont observées au dessus de la fréquence plasma f_p . Comme nous le verrons par la suite, celles-ci présentent des caractéristiques spectrales différentes et font l'objet d'une classification à part.

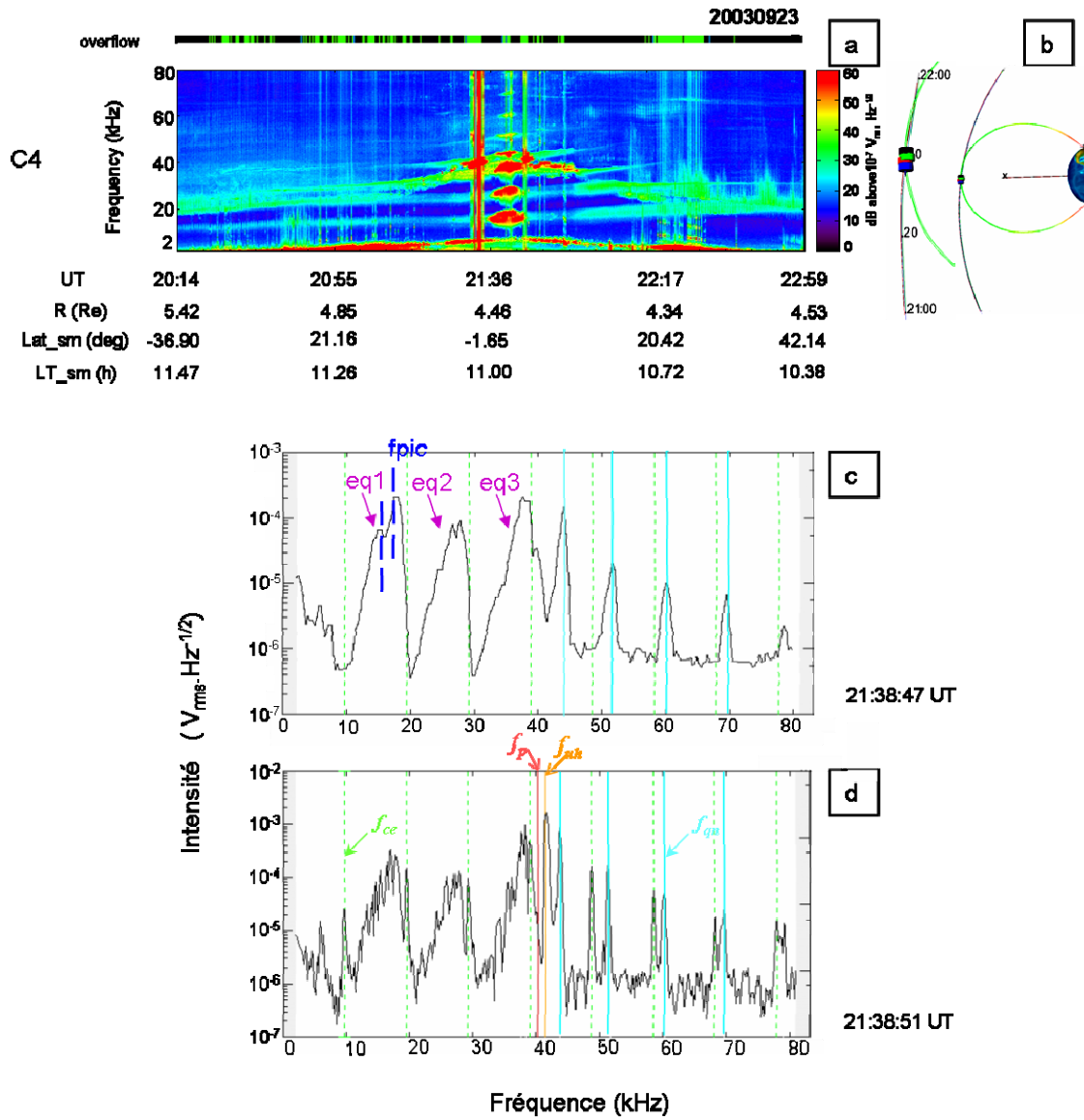


Figure 5.2: a): Spectrogramme temps fréquence des données de l'instrument WHISPER pour la traversée de plasmasphère du 23 septembre 2003;

b) Orbite des quatre satellites;

c) Spectre naturel à l'instant de l'observation des émissions équatoriales (à 21:38:47 TU). Les trois harmoniques des $(n+1/2) f_{ce}$ observés sont labellisées eq1, eq2 et eq3, les sous-structures dans la première bande harmonique sont surlignées par les tirets bleus;

d) Spectre actif des émissions à l'instant le plus proche (à 21:38:51 TU). La gyrofréquence électronique est représentée par les tirets verts, les fréquences de Bernstein f_{qn} par les traits bleus, la fréquence plasma est représentée en rouge et la fréquence hybride haute en orange.

Nous pouvons distinguer, sur le spectre naturel tracé à l'instant où les émissions équatoriales sont observées (panneau c de la Figure 5.2), les trois harmoniques notées eq_1 , eq_2 et eq_3 qui apparaissent en dessous de la fréquence plasma f_p . Les émissions électrostatiques de forme spectrale différente apparaissent aussi au dessus de la fréquence plasma f_p . Elles s'identifient parfaitement aux fréquences de Bernstein f_{qn} (Christiansen et al., 1978b). Celles-ci apparaissent aussi sous forme de résonance sur le spectre actif sur le panneau d de la Figure 5.2. Ces résonances sont déterminées avec précision grâce à la bonne résolution du mode sondeur ainsi que les autres fréquences propres du milieu (voir Chapitre 4 pour la définition de ces modes).

Notons sur le spectre naturel le feuilletage, ou éclatement en sous structures, de la première harmonique des émissions électrostatiques observées, ces sous structures sont indiquées par les tirets bleus sur le panneau c de la Figure 5.2.

Afin de caractériser ces émissions pendant toute la durée de leur observation, nous allons appliquer la méthode des maxima d'intensité sur cet intervalle.

Sur la Figure 5.3a, nous pouvons voir un zoom du spectrogramme près de la traversée de l'équateur magnétique entre 10 et 80 kHz, gamme de fréquences qui nous intéresse. Nous pouvons noter la présence de saturations de part et d'autre de l'équateur magnétique. Celles-ci sont dues à des émissions très intenses apparaissant à la fréquence plasma f_p . On peut clairement observer les trois harmoniques des émissions électrostatiques équatoriales, la fréquence plasma f_p et au dessus les modes de Bernstein f_{qn} . Le résultat de l'application de la méthode des maxima d'intensité sur les données apparaît sur le panneau b de la Figure 5.3. Le code couleur des pixels indique l'intensité relative de chaque point détecté. Nous pouvons clairement suivre les différentes lignes des maxima d'intensité qui forment une structure continue temporellement. Un léger brouillage est observé et correspond à la présence d'Overflow sur le spectrogramme. Les lignes des maxima d'intensité indiquent que la structure spectrale des émissions électrostatiques n'est pas aussi simple qu'il y paraît. En réalité, celles-ci sont composées de sous structures, tel que le dédoublement de la première bande observé Figure 5.2c. La séparation en fréquence de ces sous structures est largement supérieure à la résolution spectrale de l'instrument et peuvent ainsi être parfaitement mises en évidence.

Afin de caractériser ces émissions sur tout l'intervalle d'observation, nous allons suivre chaque ligne des maxima d'intensité. Le résultat de ce suivi nous donnera la fréquence, l'intensité et la largeur de bande de chaque ligne de fréquence, représentés sur les panneaux c, d et e de la Figure 5.3. Dans le cas d'une structure feuilletée, c'est l'intensité de la sous structure la plus intense qui est prise en compte. La largeur de bande est donnée par la largeur à mi hauteur de chaque bande d'harmonique.

Le suivi en fréquence de chaque ligne est représenté par des carrés noirs (panneau c), la fréquence plasma est représentée en rouge à titre indicatif. Nous représentons la variation des différentes résonances de Bernstein f_{qn} en bleu. Celles-ci sont déterminées grâce au mode sondeur de WHISPER. Les fréquences représentées par les lignes vertes se situent exactement aux $1.5 f_{ce}$ et $1.9 f_{ce}$ pour la première bande et aux $2.8, 3.8 f_{ce}$ pour les harmoniques supérieures. La gyrofréquence électronique f_{ce} est donnée par l'instrument FGM.

Il apparaît que les fréquences des harmoniques supérieures à la fréquence plasma se situent exactement aux mêmes fréquences que les résonances de Bernstein observées vues sur les spectres actif f_{qn} .

Afin de comparer les caractéristiques de ces deux groupes d'harmoniques, nous pouvons aussi étudier les variations de leurs intensités et largeurs de bande. Il apparaît clairement un comportement différent pour les deux types d'harmoniques. En effet les intensités du premier groupe (inférieures à la fréquence plasma f_p) sont de l'ordre de $1.10^{-5} V_{rms}.Hz^{-1/2}$ à $1.10^{-3} V_{rms}.Hz^{-1/2}$ en atteignant leur valeur maximale près de l'équateur magnétique traversé à 21:35 TU. La première bande d'harmonique, labellisée eq_1 est la plus intense des trois. Par comparaison, les intensités du groupe d'harmoniques supérieures à la fréquence plasma sont inférieures de deux ordres de grandeurs soit $1.10^{-6} V_{rms}.Hz^{-1/2}$ à $3.10^{-5} V_{rms}.Hz^{-1/2}$. De plus, en comparant les variations de la largeur de bande de chacune des harmoniques, nous pouvons constater que les harmoniques inférieures à la fréquence plasma remplissent, pour cet événement, la quasi-totalité de la bande en fréquence entre deux gyrofréquences successives avec une valeur maximale autour de 7 kHz, pour la première d'entre elles, près de l'équateur magnétique soit 7/9 de la bande. Les valeurs de la largeur de bande pour les harmoniques supérieures à la f_p se situent autour de 1 kHz, indiquant des émissions très fines en largeur spectrale.

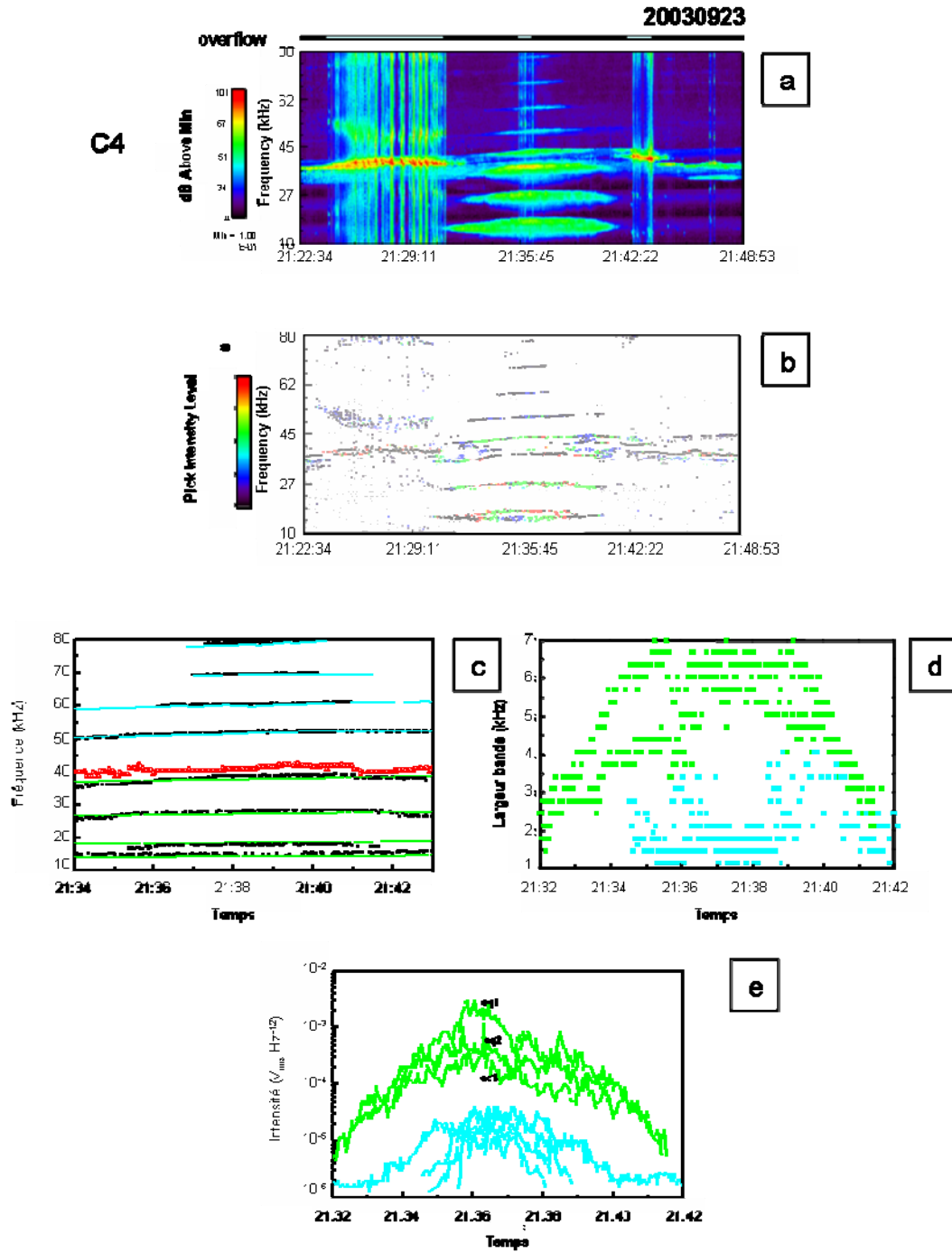


Figure 5.3 : a) Spectrogram détaillé des émissions équatoriales observées, les saturations de l'instrument WHISPER sont indiquées par la couleur bleue sur la barre au dessus du spectrogramme. b) Résultat du traitement d'image par la méthode des maxima d'intensité, le code couleur indique l'intensité relative de chaque pic. c) Résultat du suivi de chaque ligne les fréquences détectées sont représentées en noir, la fréquence plasma est représentée par les triangles rouges, les multiples de la gyrofréquence électronique sont représentées en vert et les résonances de Bernstein en bleu. d et e :) Les largeurs de bande et intensités des harmoniques observées sont indiquées en vert pour celles situées en dessous de la fréquence plasma et en bleu pour celles situées au dessus.

En résumé, nous pouvons affirmer que les deux types d'émissions diffèrent de part leur intensité et largeur de bande. La bonne résolution en fréquence de l'instrument WHISPER permet de placer avec précision les fréquences des émissions supérieures à f_p exactement aux fréquences de Bernstein f_{qn} . Nous allons donc continuer à adopter la terminologie utilisée qui consiste à dire que les émissions supérieures à la fréquence plasma f_p sont les modes de Bernstein, et celle inférieures à la f_p sont les $(n+1/2)f_{ce}$ *au sens classique du terme*, bien que celles-ci ne se situent pas exactement à ces fréquences.

Dans tout ce manuscrit, nous nous intéressons donc aux $(n+1/2)f_{ce}$ inférieures à la fréquence plasma f_p quand nous parlerons d'émissions électrostatiques équatoriales.

Les conclusions tirées de cet événement sont aussi valables pour des événements similaires. Toutefois, les intensités des harmoniques supérieures à la fréquence plasma peuvent être supérieures à celle des harmoniques inférieures f_p .

V.2.2 Structures fines des émissions équatoriales

Comme nous l'avons déjà vu dans la caractérisation spectrale de l'événement précédent, des sous structures peuvent apparaître dans les différentes bandes gyroharmoniques aux $(n+1/2)f_{ce}$. Ces structures fines ont déjà été observées auparavant, toutefois les théories existantes n'expliquent pas cette structuration en fréquence (voir Koons and Fennel, 1984). Leur présence peut être liée à des effets propagatifs sur de courtes distances dans les inhomogénéités du milieu (Barbosa, 1985)

Nous allons caractériser ces sous structures mises en évidence sur les données de l'instrument WHISPER, à travers une étude d'événement. L'étude des données à basse fréquence permettra de vérifier à l'aide des données de l'instrument STAFF s'il existe des ondes très basse fréquence à des fréquences correspondant à la séparation fréquentielles entre les sous pics.

V.2.2.a Caractérisation des structures fines

Sur la Figure 5.4, nous pouvons voir un exemple typique de traversée de plasmasphère avec observation d'émissions équatoriales. Le spectrogramme des ondes naturelles observées lors de la traversée de plasmasphère du 07 Aout 2003 est représenté Figure 5.4a. Les quatre satellites étant dans une configuration rapprochée, nous ne montrons que les données du satellite 4. Les satellites traversent une région dense autour de 14 MLT entre 06:16 TU et 10:00 TU. La fréquence plasma, représentée en blanc, croît et atteint sa valeur maximale (60 kHz) près de l'équateur magnétique autour de 08:07. Sa variation est relativement lisse sur tout l'intervalle, néanmoins, on peut noter une augmentation faible autour de 08:05 TU (avant la traversée de l'équateur magnétique), qui va de 60 à 70 kHz: cette augmentation indique l'existence d'une structure locale.

En dessous de la fréquence plasma apparaissent des émissions diffuses à des latitudes élevées. Ces émissions ne sont pas étudiées dans ce manuscrit. Elles sont probablement reliées à la classe 3 d'Hubbard et Birmingham (1978). D'autres émissions électrostatiques d'intensité faible sont observées à des latitudes plus basses, entre -10° et 10° de latitude magnétique, ces émissions sont aux $1.1 f_{ce}$. Elles sont repérées sur la Figure 5.4a par une flèche blanche. Comme nous l'avons vu plus haut (partie 5.1), ces émissions sont bien définies en fréquence et sont caractérisées par une faible largeur de bande.

Pour cet événement, nous allons étudier plus précisément les émissions situées à $(n+1/2)f_{ce}$ dans la région équatoriale, quatre harmoniques d'intensité différentes sont observées.

Sur le spectre temps fréquence enregistré à 08:09 TU (Figure 5.4b), quatre harmoniques apparaissent entre les gyrofréquences électroniques successives (indiquées en vert sur la figure), à des fréquences respectives de 15 kHz, 26 kHz, 35 kHz et 45 kHz. Ces harmoniques ont des intensités décroissantes, allant de $1.7 \cdot 10^{-5} V_{rms}.Hz^{-1/2}$ pour la première bande, jusqu'à $8 \cdot 10^{-7} V_{rms}.Hz^{-1/2}$ pour la quatrième bande.

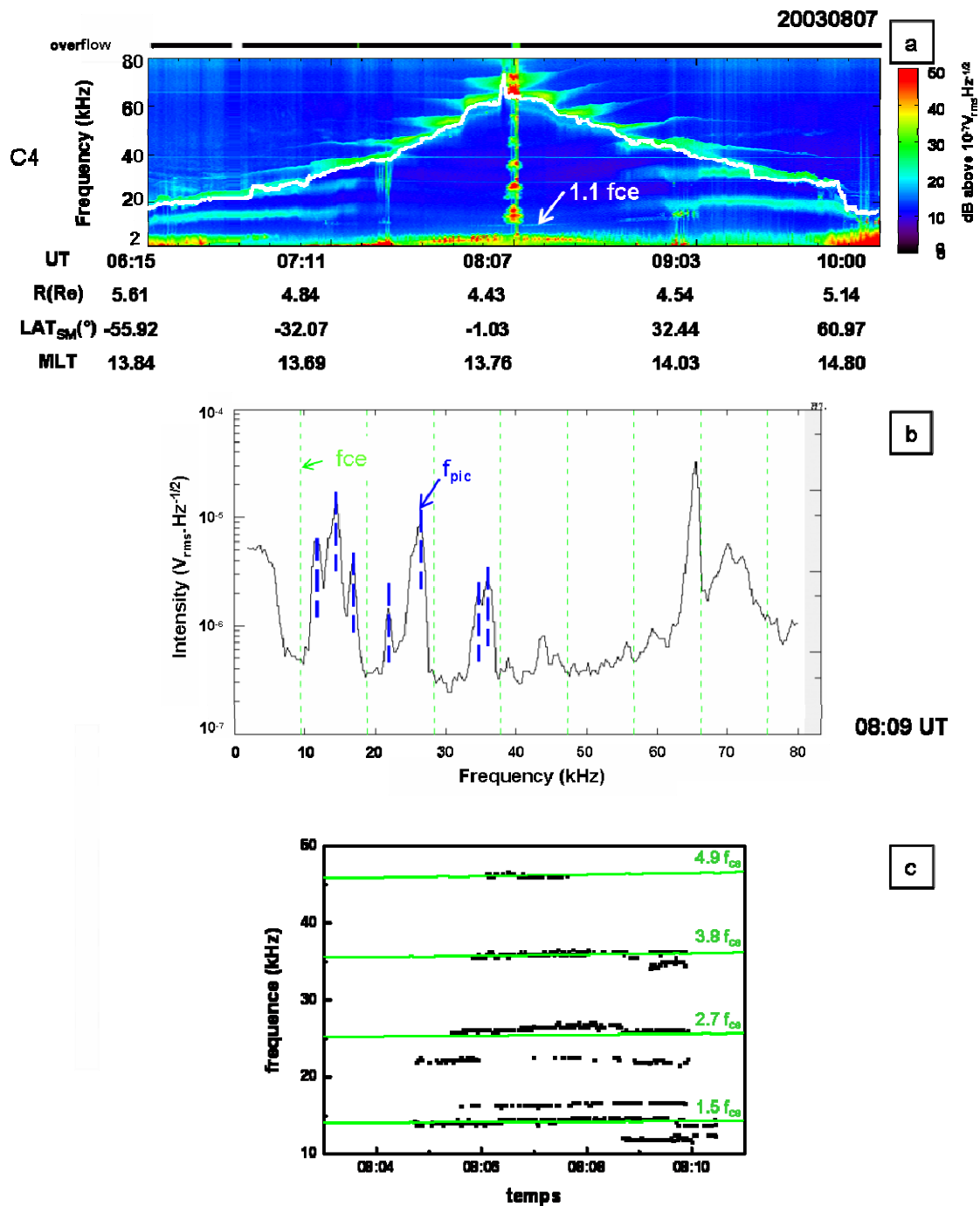


Figure 5.4: a) spectrogramme des données de WHISPER pour la traversée de plasmasphère du 07 août 2003, la fréquence plasma est représentée en blanc et les émissions à 1.1 fce repérées par la flèche blanche. b) spectre en intensité autour de 08:09 TU, la gyrofréquence électronique et ses harmoniques sont représentées par les traits en pointillés verts, la structure fine des émissions équatoriales est surlignée par les tirets bleus. c) variation de la fréquence de chaque sous structure en fonction du temps, les multiples de la gyrofréquence électronique à 1.5f_{ce}, 2.7f_{ce}, 3.8f_{ce} et 4.9f_{ce} respectivement sont indiqués en vert.

Notons que l'émission à la fréquence hybride haute f_{uh} (~ 65 kHz) est plus intense ($> 5 \cdot 10^{-5} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$) que les bandes aux $(n+1/2) f_{ce}$. Ces émissions très intenses peuvent générer une saturation de l'instrument.

Un des principaux résultats expérimentaux obtenu à partir des données de l'instrument WHISPER est la mise en évidence de la séparation en sous pics des bandes gyroharmoniques. Cette séparation apparaît clairement sur le spectre Figure 5.4b. Les sous-structures sont surlignées en bleu. sur le spectre choisi, il apparaît que la première bande se divise en trois sous pics alors que la seconde et la troisième bande se divisent en deux, avec des séparations en fréquence différentes pour chacune d'entre elles. La fréquence de chaque sous-pic est notée f_{pic} .

En appliquant la méthode des maxima d'intensité sur l'intervalle d'étude, nous pouvons suivre la variation de la fréquence des sous structures en fonction du temps (Figure 5.4c). La ligne des maxima d'intensité est suivie en fréquence pour chaque bande. La variation de cette fréquence pour chaque sous structure est représentée en fonction du temps sur la Figure 5.4c. Les carrés noirs sont le résultat du traitement tandis que les lignes représentées en vert correspondent à 1.5, 2.8, 3.9 f_{ce} . Il ressort que l'évolution des structures fines varie à la fois en fonction de la latitude et selon les harmoniques.

- La première bande harmonique (autour de $3/2 f_{ce}$) se divise en deux sous pics au début de l'intervalle (f_{pic}/f_{ce} respectivement égal à 1.5 et 1.7, soit une séparation en fréquence de 1.9 kHz), puis cette structure fine évolue pour laisser place à trois sous pics. Leurs fréquences normalisées respectives f_{pic}/f_{ce} sont de 1.25, 1.52 et 1.76.
- La seconde harmonique se divise en deux sous pics tout au long de l'observation à des fréquences normalisées f_{pic}/f_{ce} de respectivement 2.4 et 2.7.
- La troisième bande harmonique est observée autour de $3.8 f_{ce}$ avec un seul pic puis se divise en deux sous pics autour de 08:09 TU. Les fréquences normalisées f_{pic}/f_{ce} étant respectivement de 3.7 et 3.8.
- La quatrième bande harmonique ne présente pas de structure fine, elle est observée à $4.9 f_{ce}$.

La séparation en fréquence des structures fines ne s'explique pas par les variations du champ magnétique, puisque celui-ci est pratiquement constant entre deux observations (moins de 0.5% de variation).

Nous pouvons aussi noter que la séparation en fréquence des sous pics n'est pas constante tout au long de l'observation et diffère selon les harmoniques.

Nous allons chercher à voir, dans ce qui suit, si cette séparation en fréquence peut s'expliquer par l'apparition d'ondes basse fréquence. Pour cela, nous utiliserons les données de l'instrument STAFF.

V.2.2.b Ondes à basse fréquence

Dans cette partie, nous allons étudier les ondes à basse fréquence observées dans la région équatoriale, afin d'examiner leur possible implication dans l'apparition des structures fines des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$. La séparation en fréquence des structures fines étant de l'ordre du kHz, l'instrument STAFF est adapté pour faire cette étude. Les spectrogrammes combinés des données des instruments WHISPER et STAFF pour l'événement du 7 août 2003 sont représentés entre 07:40 et 09:20 TU sur la Figure 5.5.

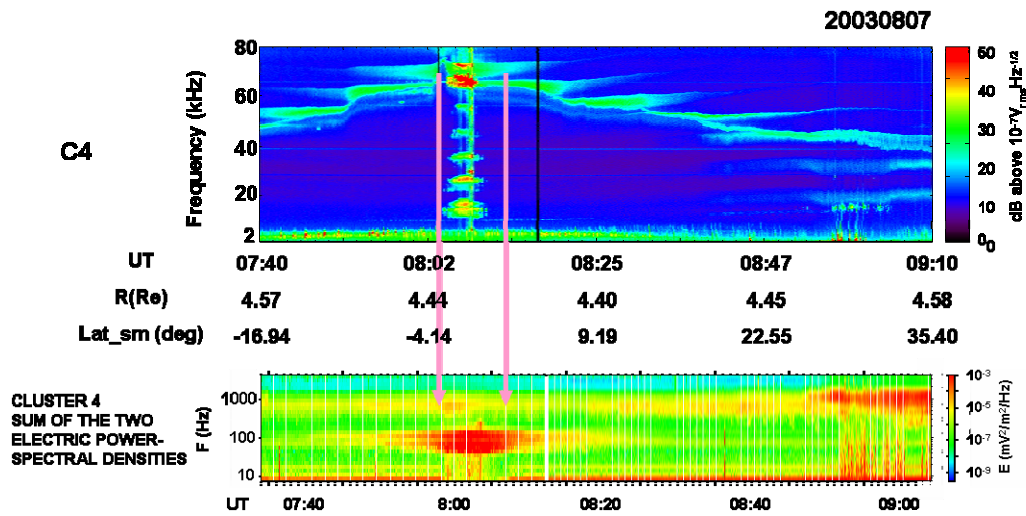


Figure 5.5: Spectrogrammes combinés des instruments WHISPER et STAFF, pour la traversée du 7 août 2003. Les données de l'instrument STAFF sont représentées entre 10 Hz et 5 kHz.

Nous avons délimité l'intervalle temporel qui nous intéresse pour l'étude des émissions équatoriales par les 2 traits de couleur rose. Sur le spectrogramme de l'instrument STAFF, notons la présence de l'« equatorial noise » (ou bruit équatorial) entre 07:50 et 08:20 TU, et autour de 100 Hz. Cette émission présente aussi une structure feuilletée (Nemec et al., 2006). Elle apparaît en dessous de la fréquence

hybride basse f_{lh} (~ 200 Hz) et au-dessus de la fréquence cyclotron protonique (~ 5 Hz). On peut aussi noter la présence du mode Sifflement sous forme de souffle (hiss) au-delà de la fréquence hybride basse f_{lh} et autour de 0.9 kHz.

Il n'y a apparemment pas de corrélation entre la présence des structures fines sur les émissions équatoriales et les ondes à basse fréquence puisque aucune onde basse fréquence n'est observées aux fréquences attendues (ici autour de 1.2 kHz).

Nous avons étudié les données de l'instrument STAFF pour d'autres événements présentant des structures fines, notamment l'événement du 23 septembre 2003 présenté plus haut, cette étude n'a pas montré de corrélation avec les ondes basse fréquence.

L'interaction onde-onde ne peut donc pas expliquer les structures fines des émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ puisqu'on n'observe pas d'ondes aux fréquences recherchées. On peut alors penser à des interactions non-linéaires ondes-particules (Dawson, 1983) ou à des effets propagatifs sur de courtes distance des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ (Barbosa, 1985 ; Labelle et Ruppert, 1999).

Les propriétés des structures fines qui sont déduites de cette étude d'événement ne peuvent être généralisées sur des événements similaires. En effet, les sous structures observées sont à des fréquences normalisées différentes, avec un nombre de sous-pics variables pour chaque événement, et une variation par rapport à la latitude magnétique plus ou moins complexe. L'étude des ondes à plus basse fréquence n'a pas montré de corrélation claire avec les sous structures qui sont observées.

Toutefois, l'étude comparée de plusieurs événements a permis de montrer que la tendance de « division » en sous structure apparaît plutôt pour des harmoniques dont l'intensité observée est relativement élevée. Plus l'émission est intense plus nous observons de sous structures, allant jusqu'à quatre sous pics au maximum. La première bande montre toujours des sous structures, même si les harmoniques supérieures en sont dépourvues, ce qui peut être expliqué par une largeur de bande plus importante pour cette première bande. Ces structures apparaissent pour tous les secteurs MLT. C'est donc un phénomène commun pour ce type d'émissions.

La question de l'origine de ces sous structures reste ouverte. Une étude plus systématique de celles-ci sur toute notre base de données permettrait de mettre en évidence l'influence du rapport f_p/f_{ce} , et de l'intensité des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées sur la division des harmoniques observées en sous structures.

V.2.3 Influence de la fréquence plasma sur le nombre d'harmoniques :

A travers des études d'événements multi-satellites à petite distance de séparation, nous allons montrer l'influence de la fréquence plasma, et par conséquent de la distance radiale à la plasmopause sur le nombre d'harmoniques observées ainsi que sur leur intensité. Pour cela, il est important d'étudier des événement ou la configuration des satellites est rapprochée et donc avec des conditions similaires d'observation, (les délais de passage entre chaque satellite ne doivent pas être supérieurs aux temps moyens de dynamique de plasmasphère).

V.2.3.a Evènement du 27 mai 2003

Dans cette partie, nous allons présenter une étude comparée d'observations d'ondes électrostatiques, et ce pour l'événement du 27 Mai 2003. Les quatre satellites CLUSTER traversent les régions dipolaires entre 19:00 et 23:00 TU, autour de 19h MLT et avec une séparation de 5000 km, L'activité géomagnétique est relativement élevée avec un Kp maximum de 4⁺ durant les 24h précédentes, un Dst de -24 et un Ae de 740 nT.

Sur le spectrogramme de la Figure 5.6 nous pouvons noter la traversée typique de plasmasphère vue par le satellite C1 avec une augmentation de la fréquence plasma jusqu'à 80 kHz environ autour de 20:00 TU et près de l'équateur magnétique. La plasmasphère présente de nombreuses structures, notamment des plumes (Darrouzet et al., 2006a) de chaque côté de l'équateur magnétique, autour de 19:45 TU pour C1 par exemple, telles que délimité par les lignes blanches.

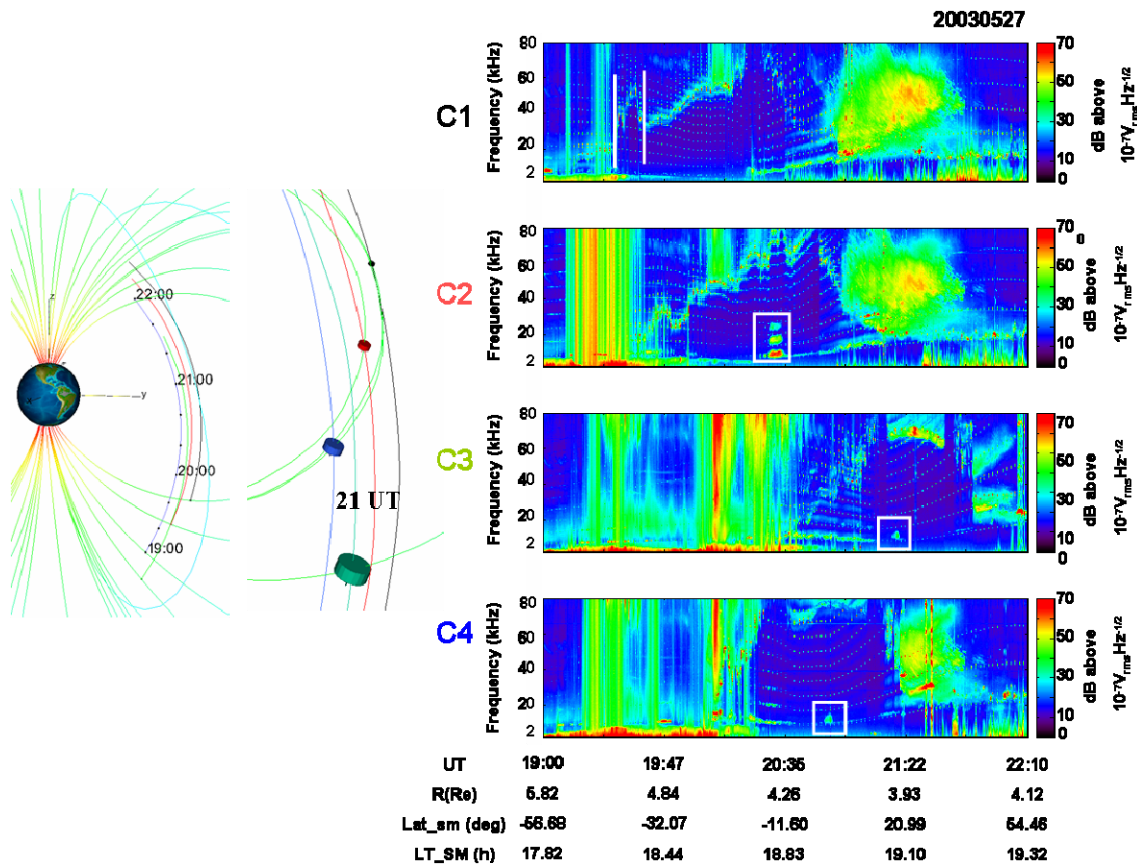


Figure 5.6: Observations d'ondes pour l'événement du 27 mai 2003, les paramètres d'orbitographie sont donnés pour le satellite C4. Orbitographie des satellites à gauche de la figure, C1 en noir, C2 en rouge, C3 en vert et C4 en bleu (code couleur adopté tout au long du manuscrit), les émissions électrostatiques équatoriales sont surlignées par le carré blanc, une plume observée par le satellite C1 est délimitée par deux traits blancs.

Des émissions électrostatiques sont observées et sont reliées à la gyrofréquence électronique f_{ce} . A la traversée de l'équateur magnétique notons la présence des émissions électrostatiques équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$, autour de 20:30 TU pour C2, 21:20 pour C3 et 20:50 pour C4, ces émissions sont surlignées par des carrés blancs sur la Figure 5.6. Le nombre d'harmoniques observées diffère selon les satellites allant d'aucune observation pour le satellite C1, à une harmonique pour les satellites C3 et C4 et trois harmoniques pour le satellite C2. Une vue détaillée de ces émissions équatoriales est représentée Figure 5.7, ainsi que leurs caractéristiques en intensité et en largeur de bande. Les valeurs de la fréquence plasma sont représentées pour C2, C3, et

C4 en fonction de la latitude magnétique. En appliquant sur chaque harmonique observée la méthode des maxima d'intensité, nous constatons que ces émissions s'étendent entre -4° et 3° de latitude magnétique. Les valeurs caractéristiques de la largeur de bande sont autour de 4 kHz. L'intensité des émissions équatoriales mesurée par le satellite C2 est de deux ordres de grandeur plus importante que l'intensité mesurée par les satellites de C3-C4. D'autre part, l'intensité de la première bande observée est plus importante que celle des harmoniques supérieures. Le maximum d'intensité est observé autour de l'équateur magnétique, soit $3 \cdot 10^{-4} \text{ V}_{\text{rms}} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ pour la première harmonique observée par C2 à une latitude magnétique de -2° . La largeur de bande de ces observations est de l'ordre de 5 kHz.

En comparant les valeurs de la fréquence plasma sur l'intervalle de latitude qui nous intéresse, nous remarquons qu'au début des observations (-2° en latitude magnétique) la fréquence plasma de C2 (57 kHz) est plus faible que C3 (63 kHz) et C4 (75kHz). Le satellite avec une fréquence plasma la plus basse (autour de l'équateur magnétique) observe donc le plus d'harmoniques. Ce satellite observe les émissions les plus intenses. Cette valeur de la fréquence plasma équatoriale (indiquant la distance à la plasmapause) est donc un régulateur du nombre d'harmoniques pour les observations aux $(n+1/2) f_{ce}$. L'étude d'un autre événement sera présentée dans ce qui suit pour confirmer la corrélation entre le nombre d'harmoniques observées et la valeur de la fréquence plasma équatoriale.

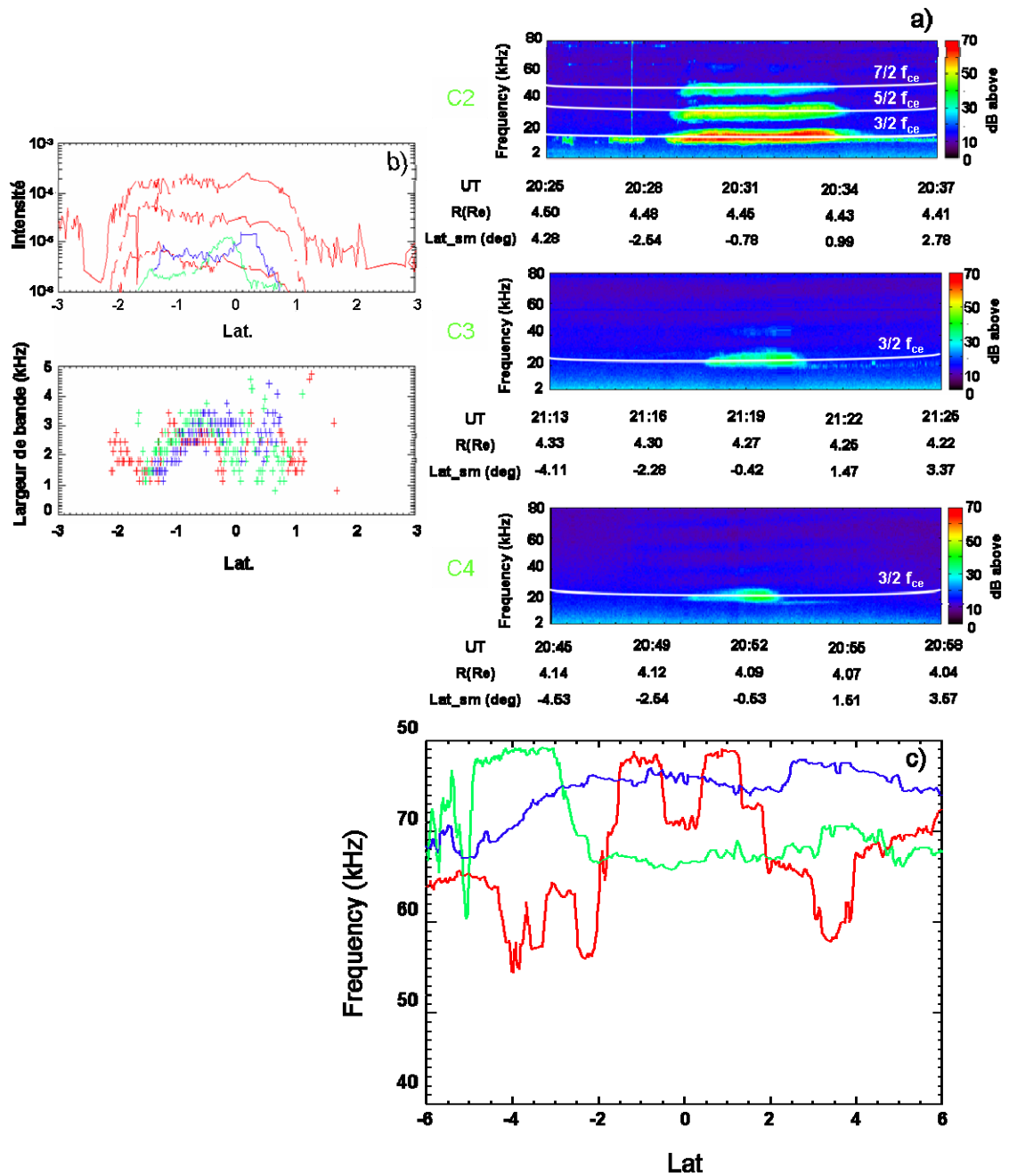


Figure 5.7: a) Observations d'ondes autour de l'équateur magnétique pour l'événement du 27 mai 2003 ; b) Intensité et largeur de bande pour les harmoniques des émissions équatoriales observées, c) Valeur de la fréquence plasma autour de l'équateur magnétique.

V.2 3.b Evènement du 2 juillet 2004

Lors du passage au périégée du 02 juillet 2004, les quatre satellites CLUSTER traversent la plasmasphère dans une configuration rapprochée (moins de 400 km de séparation) entre 07:00 et 09:00 TU autour de 16h MLT.

Comme nous le voyons sur l'orbitographie des satellites (Figure 5.8), les satellites C1 et C4 traversent en premier l'équateur magnétique autour de 07:58 TU, suivi par le satellite C2 autour de 08:05 TU, et enfin par le satellite C3 autour de 08:14 TU.

Le spectrogramme de la Figure 5.8 montre que la plasmasphère est en expansion et présente de nombreuses irrégularités de densité. L'activité géomagnétique durant les 24 heures précédant l'évènement est faible ($Dst = -10nT$, $K_p = 2^+$, $AE = 450 nT$). Le maximum de la fréquence plasma, représentée en blanc sur la figure, est supérieur à 80 kHz, et est observé à quelques degrés de latitude magnétique. Cette valeur correspondant à la limite en fréquence de WHISPER. Afin d'estimer les valeurs de la fréquence plasma dans cet intervalle, nous utilisons les données du potentiel du satellite fournies par l'instrument EFW. Des ondes électrostatiques sont observées dans la région équatoriale. Nous pouvons noter la présence d'émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$ près de l'équateur magnétique.

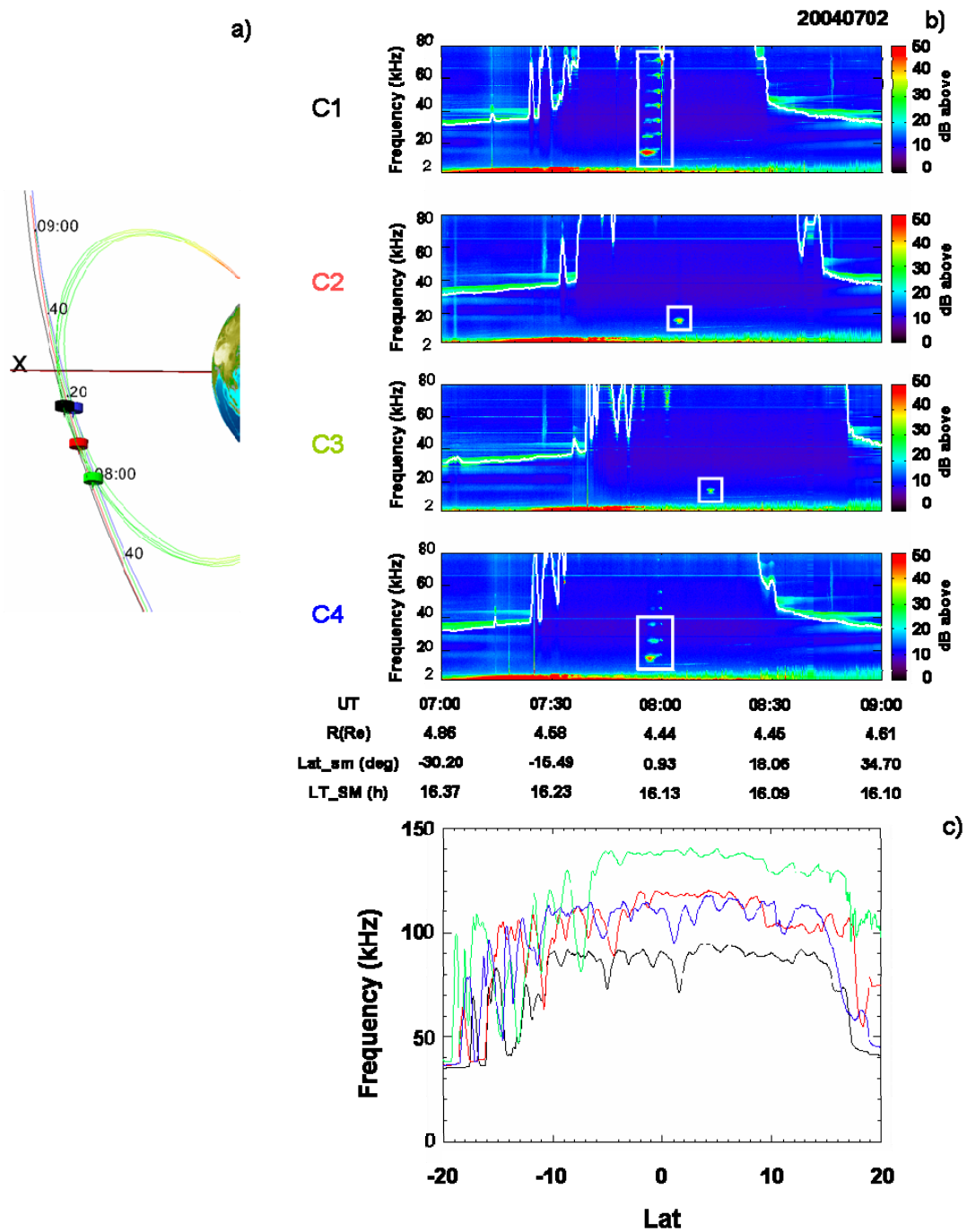


Figure 5.8: Traversée de plasmasphère du 2 juillet 2004, a) orbitographie des satellites b) spectrogrammes temps fréquence,;c) fréquence plasma équatoriale mesurée à partir de l'instrument EFW. Le code couleur utilisé est noir pour C1, rouge pour C2, vert pour C3 et bleu pour C4.

Deux séries d'harmoniques sont observées pour les satellites C1 et C4 comme on peut le voir sur la vue détaillée Figure 5.9. Elles coïncident parfaitement avec la présence d'une déplétion de densité observée par C1, et C4 autour de 1° de latitude magnétique, comme cela est surligné par les traits roses sur la figure.

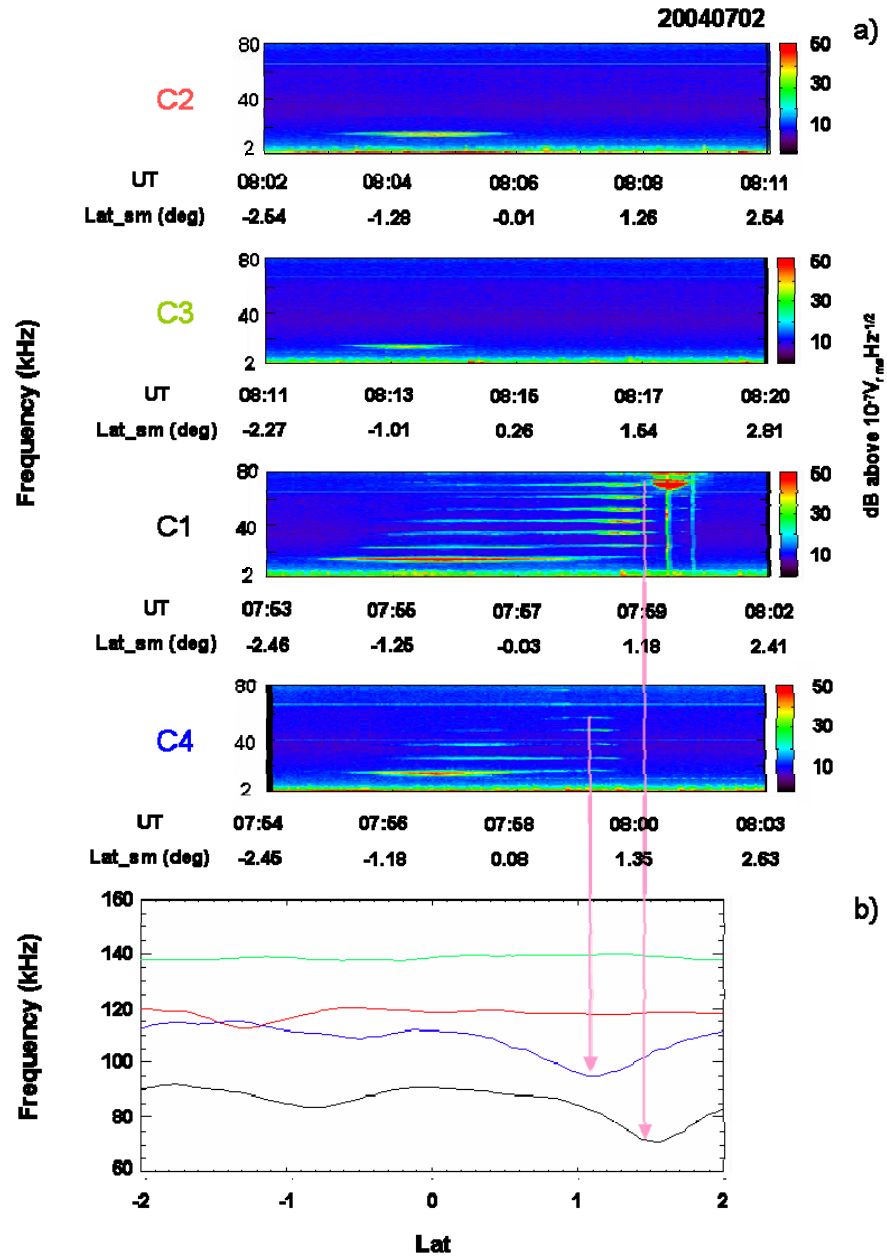


Figure 5.9: a) Vue détaillée des émissions électrostatiques observées par les quatre satellites dans la région équatoriale, b) Densité déterminée à partir du potentiel du satellite le code couleur utilisé est noir pour C1, rouge pour C2, vert pour C3 et bleu pour C4. Les creux de densité sont repérés par les flèches roses.

Pour la première série d'émissions, un nombre différent d'harmoniques est observé par les quatre satellites. (Une seule harmonique pour C3 et C2, trois harmoniques pour C4 et quatre harmoniques pour C1). Pour la seconde série d'harmoniques, sept harmoniques sont observées en partant du haut de l'intervalle de fréquence pour le satellite C1, et six harmoniques pour le satellite C4.

Nous avons utilisé la méthode des maxima d'intensité pour caractériser chacune des harmoniques et ce pour les quatre satellites. Comme on peut le voir pour les observations du satellite C1 (Figure 5.10b), les deux séries d'harmoniques sont bien séparées en fréquences, et peuvent néanmoins apparaître simultanément.

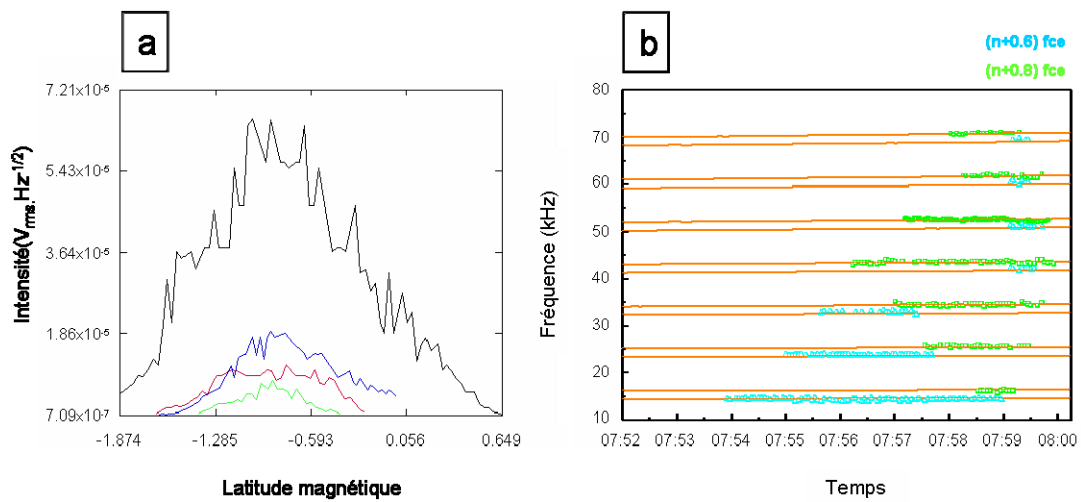


Figure 5.10: Caractéristiques des émissions équatoriales, a) intensité de la première harmonique de la première série d'harmoniques, b) fréquences des harmoniques observées pour le satellite C1.

Les fréquences de la première série d'harmoniques se situent aux $(n+0.6) f_{ce}$ et celles de la seconde série aux $(n+0.8) f_{ce}$. Pour le satellite C4, les deux séries d'harmoniques se situent aux mêmes fréquences.

Nous avons aussi comparé l'intensité de la première bande et ce pour les quatre satellites. Le satellite C1 est celui qui observe les émissions les plus intenses. En effet, le maximum d'intensité atteint est de l'ordre de $7.10^{-5} V_{rms} \cdot Hz^{1/2}$, à -0.9° de latitude magnétique, alors que les trois autres satellites observent des intensités de l'ordre de $1.10^{-6} V_{rms} \cdot Hz^{1/2}$.

La comparaison du nombres d'harmoniques observées par chaque satellite, et de l'intensité de la première bande, pour la première série d'harmoniques, permet de conclure que le satellite avec la fréquence plasma la plus basse observe le plus d'harmoniques et les plus intenses.

Pour la seconde série d'harmoniques, nous notons que le satellite qui observe une déplétion de densité la plus faible, observe le plus harmoniques.

L'étude de l'événement du 2 juillet 2004 confirme l'importance de la fréquence plasma dans le nombre d'harmoniques observées. De plus, du fait de la présence de structures locales de densité, une seconde série harmoniques d'émissions aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$ est observées sur C1 et C4.

L'importance de la valeur de la fréquence plasma dans le nombre harmoniques, permet de dire que le rapport entre les populations électron chaud/froid joue un rôle dans le processus de génération, en effet ce rapport augmente avec la distance radiale: le plasma d'origine ionosphérique est remplacé par un plasma provenant du feuillet, (plasma chaud), ce qui accroît l'instabilité et déstabiliser un plus grand nombre d'harmoniques (Ashour-Abdalla et Kennel; 1978a et b).

V.2.4 Modulation des ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$

Pour déterminer la direction des ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$ par rapport au champ magnétique $\mathbf{B}$, nous étudions les variations du taux de modulation des émissions à $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$ observées. Nous présentons les données de la traversée de plasmasphère du 8 janvier 2004.

Le spectrogramme des données de l'instrument WHISPER est représenté figure 5.11a, une représentation temps fréquence dans le plan (X_{GSE}, Y_{GSE}) du taux de modulation est représentée Figure 5.11b.

Nous observons sur le spectrogramme de l'instrument WHISPER 6 harmoniques aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$ observées en dessous de la fréquence plasma f_p autour de 22:11 TU. La première harmonique est la plus intense avec une amplitude de l'ordre de $4 \cdot 10^{-5} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$. Ces émissions apparaissent comme étant très faiblement modulées (proche de 0%), sauf sur les bords où la modulation approche une valeur de 100%. Notons aussi que l'harmonique observée près de la f_{uh} a un comportement différent avec une modulation

autour de 100%. La faible modulation des émissions indique que le champ électrique est sans orientation particulière dans le plan de spin. Ce comportement est cohérent avec des ondes polarisées perpendiculairement au champ magnétique, puisque celui-ci est proche de l'axe de spin au moment de la traversée de l'équateur.

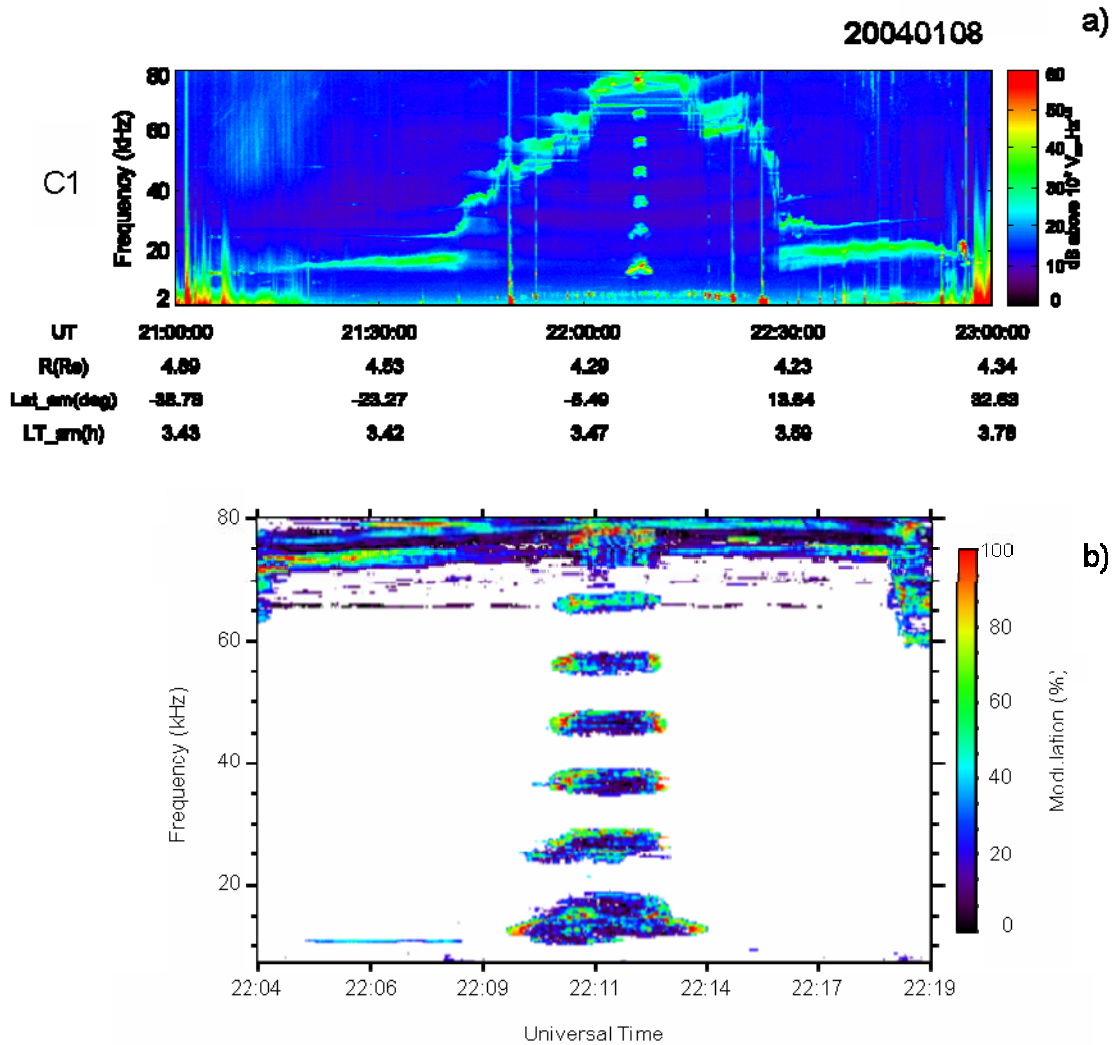


Figure 5.11 a): Spectrogramme des données WHISPER pour l'événement du 8 janvier 2004, b): Taux de modulation des ondes.

V.2.5 Emissions hors équateur magnétique

L'étude de l'événement du 26 juillet 2004 montre que les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ ne se situent pas toujours près de l'équateur magnétique. Pour cet événement les satellites sont dans une configuration rapprochée (séparation autour de 600 km) et traversent la plasmasphère entre 01:30 TU et 04:30 TU, autour de 15h MLT.

Comme on peut le voir sur le spectrogramme (Figure 5.12a et b), la plasmasphère présente de nombreuses irrégularités de densité (Darrouzet et al., 2004) et ce, pour les quatre satellites. Les variations de la fréquence plasma f_p sont représentées en blanc sur la figure. 5.12 Pour le satellite C1, nous pouvons aussi remarquer les surintensités à la fréquence plasma f_p .

Notons sur le spectrogramme, la présence des émissions électrostatiques aux $1.1f_{ce}$. Elles apparaissent en moyenne entre 5 et 20 degrés de latitude magnétique pour les quatre satellites, sauf pour le satellite C2 où celles-ci s'étendent sur les deux hémisphères. Nous remarquons aussi l'absence des émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ près de l'équateur magnétique, mais l'apparition de ces émissions, sous la même forme caractéristique de « spots lumineux », entre deux gyrofréquences électronique, pour le satellite C1 et pour le satellite C2 à des latitudes plus élevées. Ces émissions sont repérées par le carré blanc sur le spectrogramme. Nous avons représenté une vue plus détaillée des émissions observées pour le satellite C1 sur le bas de la figure.

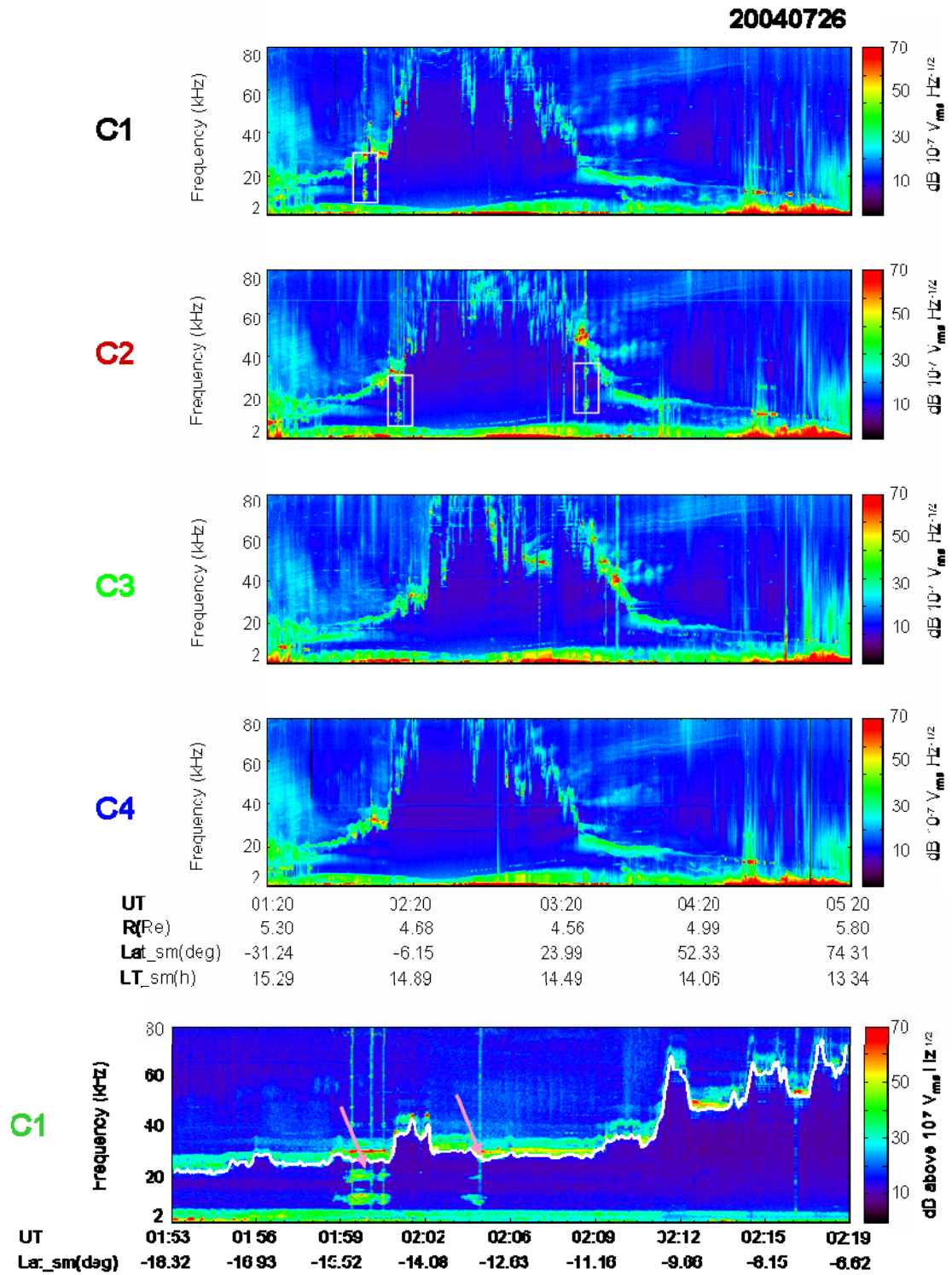


Figure 5.12: Spectrogramme temps fréquence pour les quatre satellites CLUSTER lors de la traversée de plasmasphère du 28 juillet 2004, le carré blanc indique la présence d'émissions aux $(n+1/2) f_{ce}$, la figure du bas représente une vue détaillée de ces émissions pour le satellite C1, la fréquence plasma est représentée par la ligne blanche.

Celles-ci apparaissent clairement sous forme de deux séries d'harmoniques autour de 01:59 TU, puis de 02:05 TU, respectivement à des latitudes de -15° et -12° . Deux harmoniques sont observées, juste en dessous de la fréquence plasma f_p (en blanc sur la figure). Ces émissions coïncident parfaitement avec la présence de surintensité du signal à la fréquence plasma (de l'ordre de 20 dB par rapport à l'intensité moyenne autour de $10^{-5} \text{V}_{\text{rms}} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$). Elles coïncident aussi avec la présence de déplétions locales de densité.

La caractérisation spectrale de ces émissions électrostatiques montre qu'elles se situent respectivement autour de $1.5 f_{ce}$ pour la première harmonique, puis autour de $2.7 f_{ce}$ pour la seconde harmonique, celles-ci se subdivisent en deux sous pics comme indiqué sur la Figure 5.13.

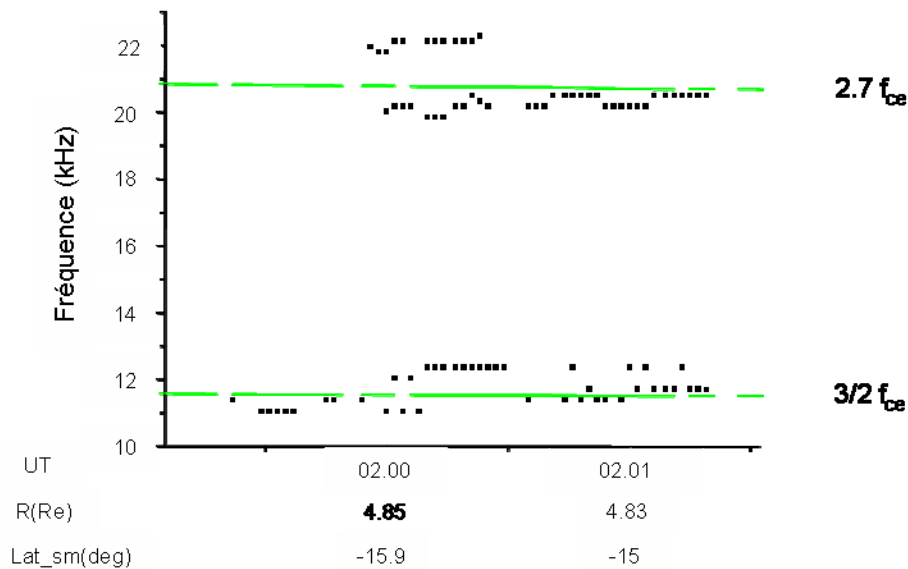


Figure 5.13: Représentation du résultat de suivi de la ligne des maxima d'intensité pour les deux harmoniques observées en dehors de l'équateur magnétique par le satellite C1.

Leur largeur de bande est autour de 4 kHz, ce qui confirme que ces émissions observées en dehors de la région équatoriale, présentent les mêmes caractéristiques spectrales que celles plus usuelles situées dans la région équatoriale.

Ces observations sous forme de spots lumineux aux $(n+1/2)f_{ce}$ aux latitudes élevées sont donc reliées à la présence de déplétions de densité. La même observation a été faite dans la région équatoriale dans le cas du 02 juillet 2004 qui présentait aussi une signature d'ondes électrostatiques reliées à la déplétion de densité.

Nous pouvons donc dire que ces déplétions de densité jouent un rôle sur l'apparition des ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$.

L'observation de ces ondes à $(n+1/2) f_{ce}$ en dehors de la région équatoriale reste un phénomène marginal soit moins de 10 événements sur trois années de données. Néanmoins cet exemple montre l'importance de la fréquence plasma et des gradients locaux de densité dans l'apparition des émissions électrostatiques aux $(n+1/2) f_{ce}$ aux latitudes explorées par CLUSTER.

V.2.6 Conclusion

En résumé, à travers ces différentes études d'événements nous avons pu faire ressortir quelques unes des caractéristiques spectrales des émissions électrostatiques aux $(n+1/2) f_{ce}$.

Dans notre manuscrit nous allons appeler émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ toute observation d'ondes sous forme de « spot » lumineux située entre 2 gyrofréquences électroniques et observées en dessous de la fréquence plasma f_p . Les émissions situées au dessus de la fréquence plasma f_p sont définies comme étant les ondes de Bernstein f_{qn} (Christiansen et al., 1978a).

L'application de la méthode du suivi des maxima d'intensité pour les différents événements étudiés a permis de montrer que la structure spectrale de ceux-ci est complexe.

Leur fréquence ne se situe pas toujours exactement aux $1/2$ de f_{ce} , avec un décalage en position des fréquences pour les harmoniques supérieures. Ceci peut s'expliquer par des mécanismes d'instabilité différents tels que ceux liés au cône de perte pour les observations à des fréquences inférieures aux $1/2$ de f_{ce} , et une anisotropie thermique pour les observations supérieures aux $1/2$ de f_{ce} (Ashour-Abdalla et Kennel, 1978b).

Une structure fine ou feuilletage de ces émissions est observée avec l'éclatement d'une bande harmonique en plusieurs sous-pics. Ceux-ci sont séparés en fréquence avec des valeurs variables. La séparation en fréquence ne reste pas constante lors d'une même observation. Il n'y a pas de corrélation claire entre le feuilletage des émissions équatoriales et la variation du champ magnétique. L'étude des données à basse

fréquence n'a pas montré de corrélation entre les ondes observées à basse fréquence et les structures feuilletées des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées.

Le maximum d'intensité observé se situe toujours près de l'équateur magnétique, et l'intensité de la première harmonique est en général plus forte que celle des harmoniques supérieures (Christiansen et al., 1978a).

La largeur de bande de la première harmonique des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ occupe environ 70% de l'intervalle en fréquence entre 2 gyrofréquences électroniques successives. Cette valeur étant moins importante pour les harmoniques supérieures.

Ces événements sont confinés à l'équateur magnétique avec une gamme de latitude allant de -2° à 2° de latitude magnétique.

Il apparaît clairement sur nos événements, que ces émissions peuvent être observées avec un nombre différent d'harmoniques, propriété qui est liée à la proximité à la plasmopause. Cette distance à la plasmopause peut être quantifiée par la valeur de la fréquence plasma équatoriale, comme nous le verrons dans le chapitre 6.

Néanmoins quelques événements se différencient des autres de part leur propriété particulière, telle que l'apparition à des latitudes élevées, ou en rapport avec la présence de déplétions de densité.

Ces émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ semblent donc être un phénomène commun à tous les passages au périgée. Un des résultats expérimentaux notables de ces observations effectuées par l'instrument WHISPER est la confirmation de l'existence de structures fines, qui ont déjà été observées (Koons et Fennel, 1984 ; Labelle et Ruppert, 1999) mais qui n'ont toujours pas été expliquées par les théories actuelles.

V.3 Emissions électrostatiques aux $n(1.1)f_{ce}$

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à un autre type d'émissions observées dans la plasmasphère, les émissions électrostatiques aux $n(1.1)f_{ce}$. Ces émissions se différencient des émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ de part leur durée, leur extension en latitude magnétique, leur intensité et leur largeur de bande.

Nous allons présenter un événement typique de ces observations d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$. Comme on peut le voir sur le spectrogramme Figure 5.14 lors du passage au périgée du 15 août 2002, les quatre satellites traversent une plasmasphère dynamique et en expansion large ($Dst=-22$ nT, $Kp=3^+$ maximum durant les 24 heures précédentes). Sa forme va nettement changer entre les passages de C1 et C3. C1 traverse l'équateur magnétique tout d'abord autour de 08:20 TU, avec une valeur maximale de fréquence plasma autour de 80 kHz. Une double plume est observée. C3 traverse l'équateur magnétique autour de 09:30 TU avec une fréquence plasma supérieure à la limite de WHISPER (80 kHz). La plasmasphère est donc en expansion large.

Des différences apparaissent dans les ondes observées, C1 étant le seul satellite à observer les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ près de l'équateur magnétique avec trois harmoniques. Notons aussi, pour le satellite C1, l'observation d'une onde à $1.1 f_{ce}$ entre -6° et 17° de latitude magnétique. Les satellites C2, C3 et C4 observent uniquement les ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ avec un nombre variable d'harmoniques allant de 1 à 3. La première harmonique de ces émissions est surlignée par un carré blanc sur la Figure 5.14.

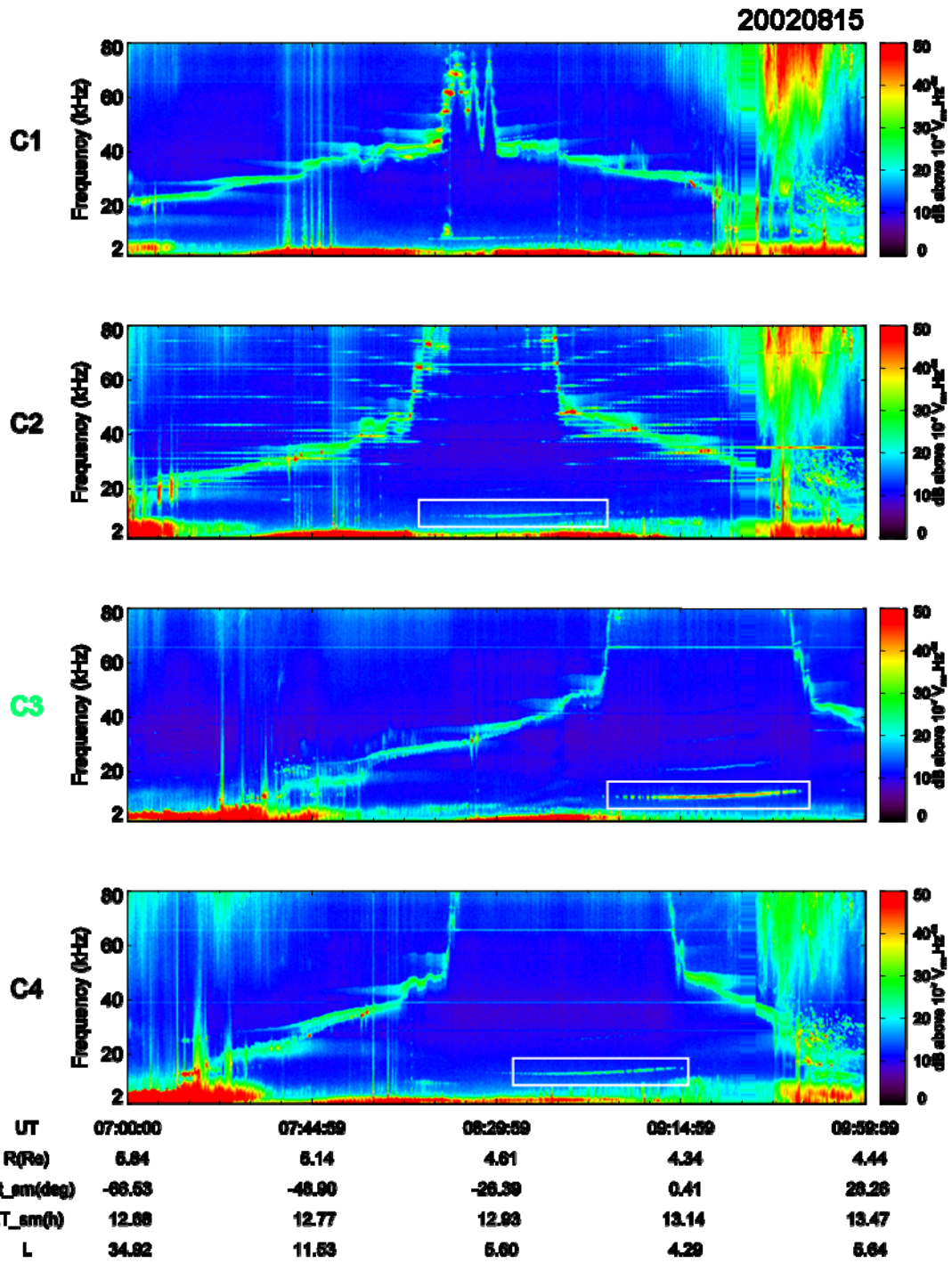


Figure 5.14: Spectrogrammes temps-fréquence pour la traversée de plasmasphère du 15 août 2002, les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ sont repérées par le carré blanc pour les satellites C2, C3 et C4, les paramètres d'orbitographie sont donnés pour le satellite C3.

Afin de caractériser ces émissions, nous allons d'abord appliquer la méthode des maxima d'intensité, puis nous allons chercher à voir si ces émissions présentent une orientation particulière par rapport au champ magnétique $\mathbf{B}$.

V.3.1 Caractérisation en fréquence

Dans cette partie, nous allons appliquer la méthode des maxima d'intensité sur les données du satellite C3. Comme on l'a vu dans la partie « moyens d'études », nous sommes capable de suivre avec une bonne précision chacune des harmoniques observées (voir Figure 4.5). Le résultat de l'application de cette méthode est représenté Figure 5.15.

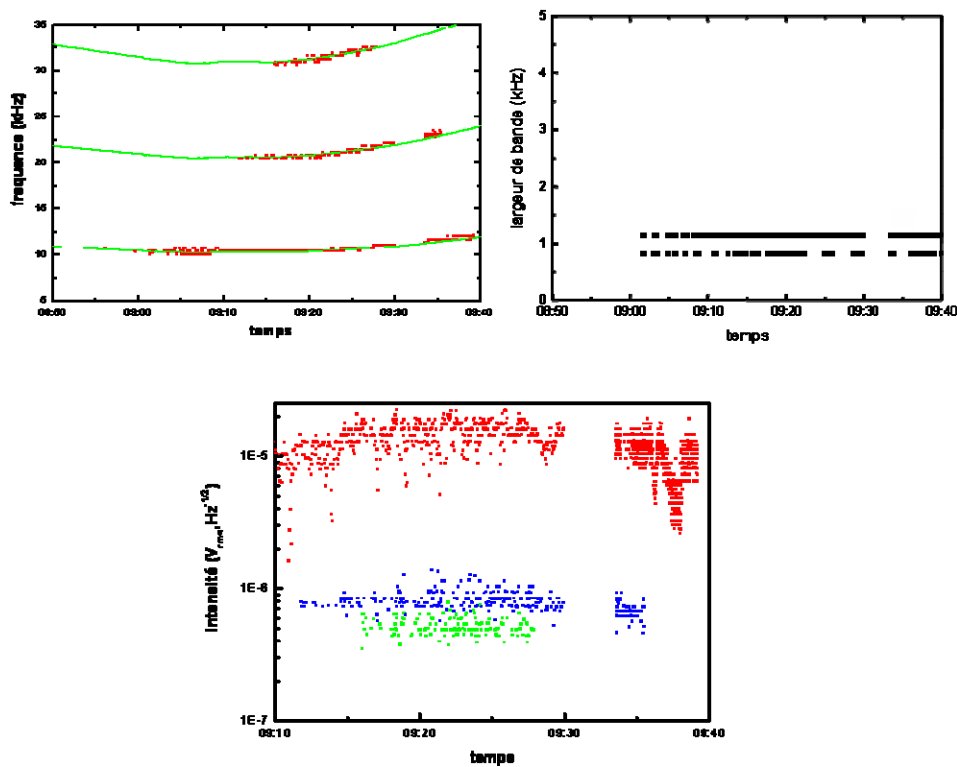


Figure 5.15 : Résultats du traitement par la méthode des maxima d'intensité pour les émissions aux $n(1.1) f_{ce}$ pour le satellite C3, fréquence des harmoniques en fonction du temps, largeur de bande et intensité, les fréquences détectées par la méthode sont indiquées par des carrés rouges alors que les multiples de la gyrofréquence électronique sont indiquées en vert, l'intensité est représentée sous différentes couleurs, rouge pour la première harmonique, en bleu et vert pour les autres.

Il apparaît clairement que trois harmoniques sont observées, et se situent exactement aux $n(1.1)f_{ce}$. L'intensité mesurée est représentée en rouge pour la première harmonique, en bleu pour la seconde et en vert pour la troisième. L'intensité de la première bande observée à $1.1 f_{ce}$ est de deux ordres de grandeur plus importante que celle des harmoniques supérieures. Sa valeur est de l'ordre de $10^{-5} \text{ Vrms.Hz}^{-1/2}$, ce qui est relativement élevé pour ce type d'observations. La largeur de bande a une valeur de l'ordre 1 kHz.

Les intensités et les largeurs de bande restent quasiment constantes avec moins de 5% de variation le long de l'intervalle de latitude magnétique étudié ($-15^\circ, 15^\circ$).

Ces émissions aux $n(1.1) f_{ce}$ diffèrent des émissions électrostatiques aux $(n+1/2) f_{ce}$ de part leur extension en latitude magnétique d'abord, de part leur intensité et largeur de bande ensuite, et enfin de part leurs fréquences d'observations. Ce qui en fait donc une « catégorie » à part dans les observations d'ondes dans la plasmasphère.

V.3.2 Orientation par rapport au champ magnétique B

De même que pour les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$, nous allons calculer le taux de modulation de ces ondes pour les observations d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$. Pour cette étude, nous analysons les données de l'événement du 15 aout 2002. Le taux de modulation dans le plan $X_{GSE} Y_{GSE}$ est représenté dans la Figure 5.16. Le taux de modulation est variable et ne présente pas de tendance particulière, passant de 0% à 100% entre deux spectres successifs.

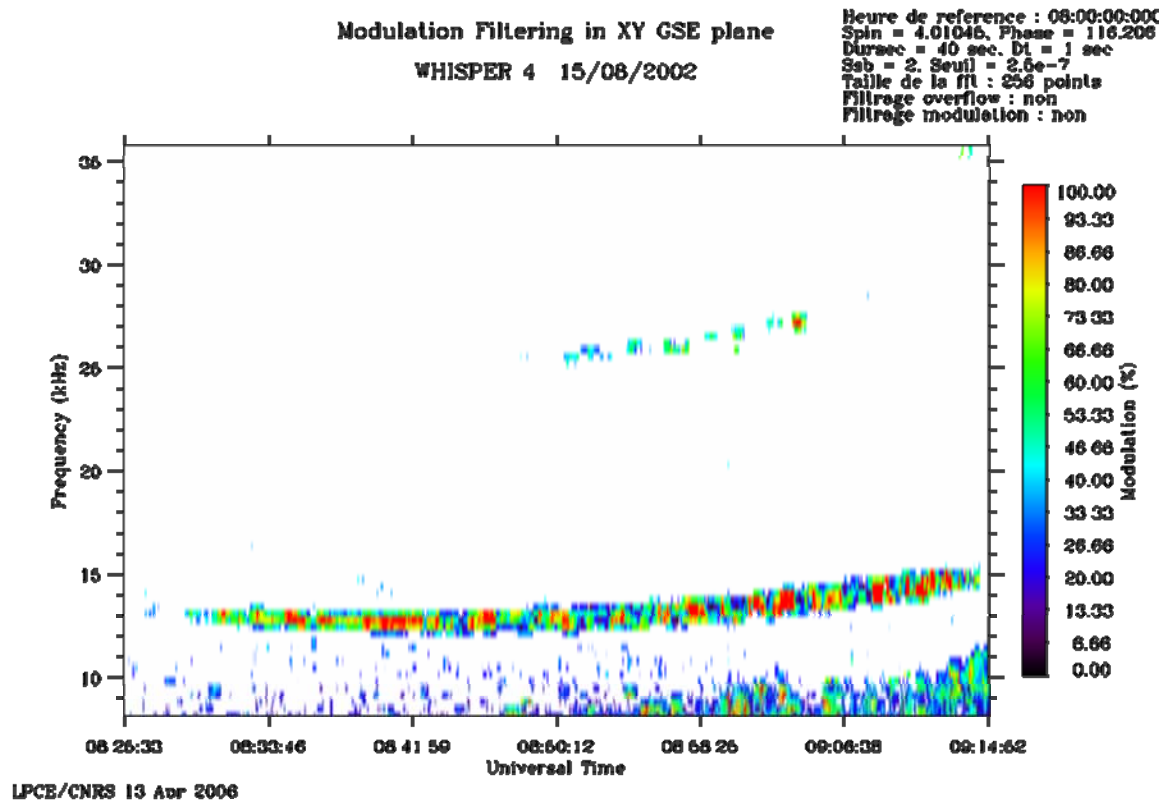


Figure 5.16 : Taux de modulation pour les ondes aux $n(1.1) f_{ce}$ pour l'événement du 15 août 2002.

V.4 Observation d'ondes aux nf_{ce}

La bonne résolution de WHISPER nous a permis d'observer pour la première fois des ondes aux nf_{ce} , les caractéristiques spectrales de ces ondes sont présentées dans ce qui suit.

V.4.1 Caractéristiques spectrales

Les caractéristiques spectrales de ces émissions seront mises en évidence à travers une étude d'événement caractéristique. Sur le spectrogramme de la Figure 5.17, nous pouvons voir les données de l'instrument WHISPER à bord de C4 pour la traversée de plasmasphère du 17 mars 2004. Lors de cette traversée, les satellites sont en configuration rapprochée et ont des observations similaires. Comme précédemment,

nous choisissons de représenter les données de C4, parce que les résonances créées par EDI ne sont pas visibles (EDI ne fonctionne pas sur ce satellite)

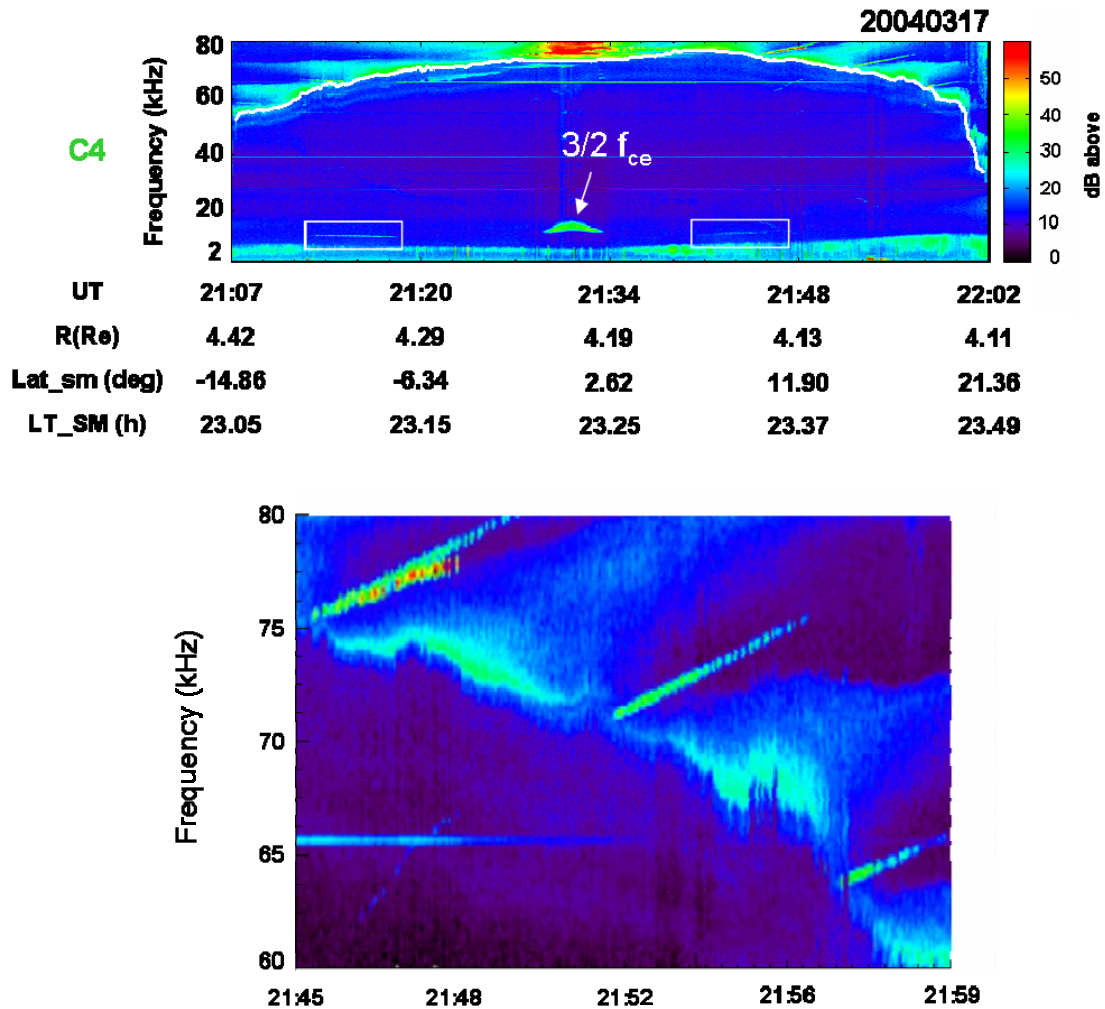


Figure 5.17: Spectrogramme temps fréquence pour la traversée de plasmasphère du 17 mars 2004 , les paramètres d'orbitographie sont donnés dans le système de coordonnées SM, la fréquence plasma est représentée par la ligne blanche, les observations autour de $1.1 f_{ce}$ sont surlignées par le carré blanc. Vue détaillée des émissions monochromatiques aux nf_{ce} .

Les satellites traversent la plasmasphère entre 21:00 et 22:00 TU. L'augmentation puis la diminution typique de la fréquence plasma est représentée en blanc sur la Figure 5.17. La présence des ondes électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ marque la traversée de l'équateur magnétique autour de 21:30 TU. Lors de ce passage une seule harmonique est observée, celle-ci est pointée par une flèche blanche sur la Figure 5.17.

Notons aussi l'observation d'une onde à $1.1 f_{ce}$, dans les deux hémisphères, entre 21:10 et 21:20 TU puis entre 21:40 et 21:50 TU, surlignée par les rectangles blancs sur la Figure 5.17.

Enfin, le zoom de spectrogramme pris entre 21:45 et 22:00 TU indique la présence de petites structures fines au dessus de la fréquence plasma f_p , bien définies en fréquence et avec une faible largeur de bande. Ces émissions apparaissent exactement aux multiples de la gyrofréquence électronique et sont observées dans les deux hémisphères. Dans cet exemple, trois harmoniques sont observées dans l'hémisphère nord. L'observation de ces harmoniques ne se fait jamais de façon simultanée.

Nous allons appliquer la méthode des maxima d'intensité afin de déterminer les caractéristiques spectrales de ces ondes.

Les résultats obtenus sont représentés Figure 5.18. La fréquence plasma y apparaît en noir, les gyrofréquences électroniques déterminées par FGM en vert, et les points expérimentaux déterminés par la méthode des maxima d'intensité en rouge.

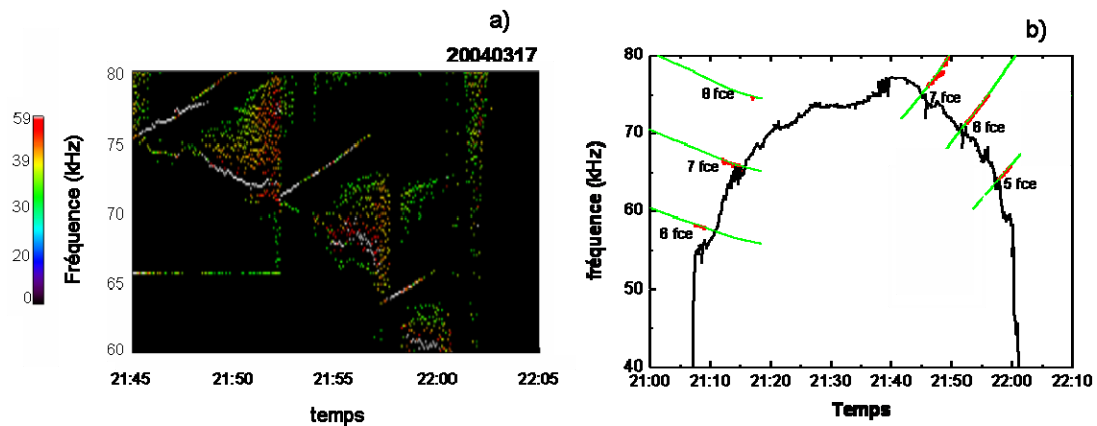


Figure 5.18: a) Méthode des max d'intensité, b) fréquences caractéristiques

Nous pouvons remarquer que ces émissions apparaissent à des fréquences supérieures à la fréquence plasma. Leurs fréquences se situent exactement aux multiples de la gyrofréquence électronique (donnée par l'instrument FGM).

Comme on peut le voir, les observations ne sont pas complètement symétriques de part et d'autre de l'équateur magnétique. Il n'apparaît d'observation à nf_{ce} pour la cinquième harmonique que dans l'hémisphère Nord et d'observation à la huitième harmonique que dans l'hémisphère Sud.

Ces ondes prennent naissance à partir de la fréquence plasma, quand l'harmonique inférieure disparaît. Autrement dit, deux harmoniques ne peuvent exister simultanément, et l'énergie saute d'une harmonique à l'autre successivement.

L'intensité de ces ondes est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$ et reste du même ordre de grandeur pour les différentes harmoniques à part pour la 7eme harmonique qui a une intensité plus importante ($3 \cdot 10^{-4} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$).

Nous pouvons aussi noter sur le spectrogramme que ces ondes ont une intensité corrélée à la rotation du satellite, ce qui indique une direction privilégiée du champ électrique de ces ondes par rapport au champ magnétique statique. Nous pouvons donc appliquer la méthode de directivité peut alors être utilisée afin de déterminer la direction de propagation des ondes.

V.4.2 Direction de propagation

L'intensité des émissions aux nf_{ce} est corrélée à la rotation du satellite, nous allons donc évaluer le taux de modulation de ces ondes (Pour la définition de la modulation voir chapitre 4) ainsi que l'angle entre le champ électrique et le champ magnétique aux instants d'observation des ondes à nf_{ce} .

V.4.2.a Modulation

Sur la Figure 5. 19, on peut voir une représentation temps-fréquence dans le plan (X_{GSE} , Y_{GSE}) de la modulation. On remarque que les émissions à nf_{ce} présentent un fort taux de modulation (autour de 90 à 100%).

Cette modulation élevée indique une polarisation linéaire de l'onde dans le plan de spin.

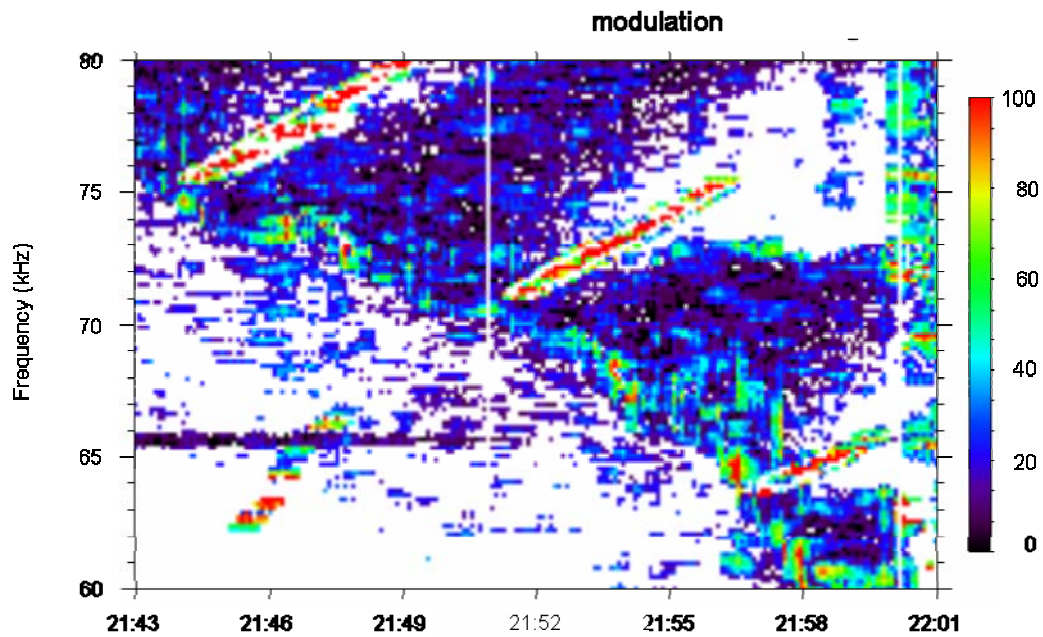


Figure 5.19: Modulation sur l'intervalle d'observations des ondes aux nf_{ce}

V.4.2.b Orientation par rapport à $\mathbf{B}$

Connaissant la direction de l'angle $\mathbf{B}$ par rapport au plan de spin, il est possible de déterminer l'angle θ entre la direction du champ électrique et le vecteur $\mathbf{B}$, c'est ce que nous allons étudier pour l'événement du 17 mars 2003.

La méthode des maxima d'intensité permet de déterminer l'intensité des émissions observées à nf_{ce} . Nous allons tracer l'évolution de cette intensité par rapport à l'angle θ mesuré. Ces variations sont représentées dans la Figure 5.20 pour les harmoniques labellisées M5, M6 et M7 observées dans l'hémisphère nord. Un ajustement numérique de forme sinusoïdale pour ces observations est indiqué sur la figure en rouge. On peut voir que l'intensité maximale mesurée correspond à un angle θ de 90° , ce qui confirme le comportement attendu du mouvement de giration des électrons autour du champ magnétique $\mathbf{B}$.

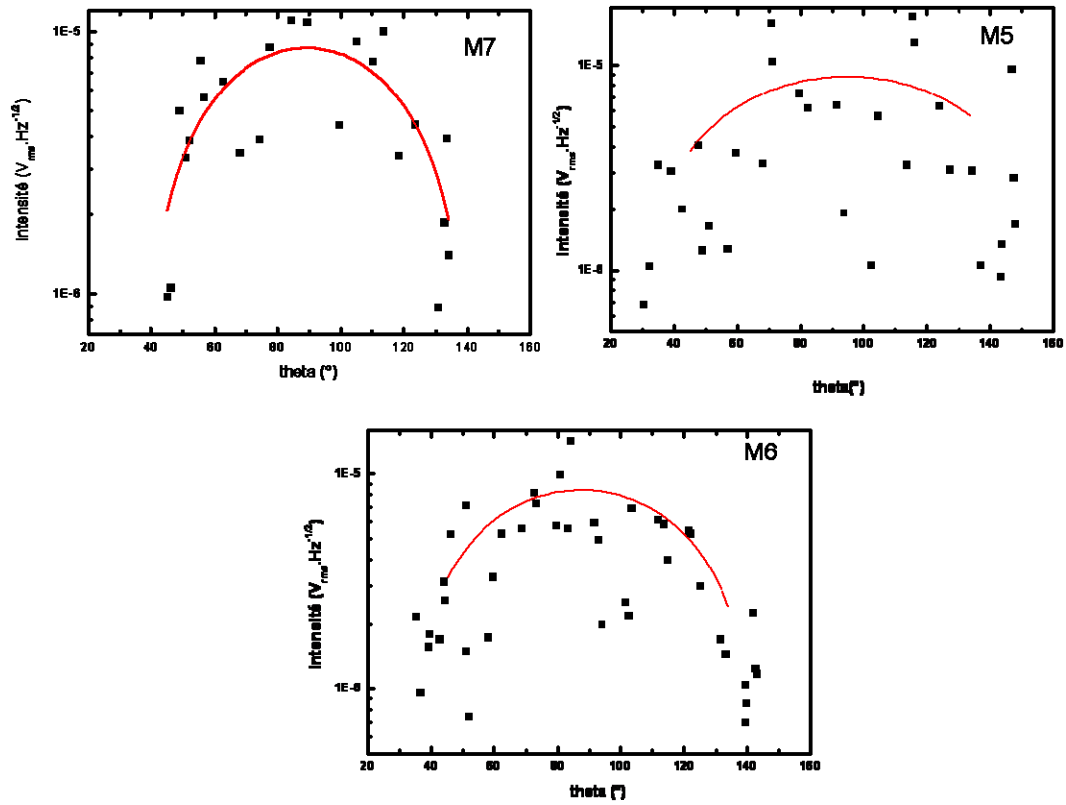


Figure 5.20: Variations de l'intensité des ondes à nf_{ce} mesurées par rapport à l'angle θ pour les harmoniques à 5, 6 et 7 f_{ce} mesurées dans l'hémisphère nord.

La bonne résolution de WHISPER a donc permis de mettre en évidence pour la première fois ces ondes monochromatiques à nf_{ce} ; celles-ci sont fortement modulées. En l'absence de mesure de la forme d'onde, on ne peut toutefois pas conclure quant à la nature électrostatique ou électromagnétique de ces émissions.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu voir à travers des études d'événements les différents types d'ondes observées par WHISPER lors de la traversée de la plasmasphère. Notre étude d'événements est volontairement morphologique et descriptive sur les caractéristiques en fréquence intensité et latitude d'observations des ondes observées. Ceci nous a permis de distinguer clairement les émissions les unes par rapport aux autres.

Nous rappelons dans la Table 5. 1 les différents types d'ondes observés ainsi que leurs caractéristiques et leur possible lien avec une classification antérieures. Ces propriétés sont déterminées à partir d'études d'événements représentatifs, tout en vérifiant que ces propriétés restent valables pour des observations du même type.

Nous avons ainsi proposé notre propre classification des ondes observées dans la plasmasphère en levant quelques ambiguïtés parfois existantes notamment sur l'observation des ondes multiples autour des $(n+1/2)f_{ce}$.

De par la caractérisation spectrale, nous pouvons voir que les ondes équatoriales autour des $(n+1/2)f_{ce}$ sont les émissions les plus intenses observées dans cette région à des fréquences supérieures à f_{ce} .

Nous nous sommes ensuite focalisés plus particulièrement sur 3 types d'ondes observés :

- Les émissions électrostatiques équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$
- Les émissions aux $1.1 f_{ce}$ à des latitudes élevées
- Les émissions aux nf_{ce}

Les deux résultats notables obtenus à partir de WHISPER sont la structure fine des émissions équatoriales, et la mise en évidence des émissions au nf_{ce} .

Les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ ont été plus communément étudiées, et leur processus de génération est relativement bien connu, les émissions aux nf_{ce} n'ont cependant jamais été observées auparavant mais seulement prédites par une théorie relativiste basée sur un effet maser cyclotron (Farrel., 2000).

Une statistique sur ces différentes observations d'ondes sera présentée dans le Chapitre 6.

	Fréquence d'observation	Latitude (°)	Δf (kHz)	Intensité ($V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$)	Classification antérieure
Emissions fines (nf_{ce})	$f > f_p$ nf_{ce}	-10,10	<0.1	Jusqu'à 10^{-5}	Jamais observé auparavant
Emissions intenses autour de f_p (f_{uh})	$f = f_{uh} = nf_{ce}$	-10,10	~ 1	Jusqu'à 10^{-5}	Classe 4
Coupure haute (f_{qn})	f_{qn}	-30,30	~ 1	$\sim 10^{-6}$	Non classé, relié à la f_p
Bande diffuses	$(n+0.1)f_{ce} < f < (n+0.9)f_{ce}$ $n > 1, f < f_p$	-30,30	[2, 4]	$5 \cdot 10^{-7} < I < 10^{-6}$	Classe 3
Emissions naturelles f_q	$nf_{ce} < f < (n+1)f_{ce}$ $f \sim f_q$	Généralement EQ	$\sim 1-2$	$\sim 10^{-5}-10^{-3}$	Parfois confondu avec Classe 2
Emissions ES $(n+1/2)f_{ce}$	$(n+0.1)f_{ce} < f < (n+0.9)f_{ce}$ $n > 1, f < f_p$	Généralement EQ	$\sim 1-5$	$\sim 10^{-6}-10^{-2}$	Classe 1b mono Classe 2 multi
Emissions ES $n(1.1)f_{ce}$	$f = n(1.1)f_{ce}$ $n > 1, f < f_p$	-15,15	~ 1	$\sim 10^{-6}-10^{-5}$	3/2 basse (Classe 1a)

Tableau 5.1: Rappel des différentes observations dans la plasmasphère et leurs caractéristiques respectives, nous relierons aussi ces classifications à celle existant précédemment donnée par Hubbard et Birmingham (1978).

Etude statistique sur les observations plasmasphériques

Après avoir vu que les émissions observées dans la plasmasphère, diffèrent de part leurs caractéristiques spectrales, nous allons vérifier à travers une étude statistique, si elles diffèrent aussi de par leur position en secteur MLT et leur extension en latitude magnétique. Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux ondes électrostatiques présentes entre deux harmoniques de la gyrofréquence électronique successives et aux émissions aux nf_{ce} qui n'ont jamais été observées auparavant.

Pour cette étude statistique, nous avons analysé trois années de données WHISPER lors du passage au périégée de CLUSTER dans la plasmasphère (autour de 4 R_t). De par son orbite polaire, CLUSTER est parfaitement bien adapté pour étudier les ondes dans la région équatoriale en traversant de façon claire et non ambiguë l'équateur magnétique, et en couvrant tous les secteurs MLT de façon égale sur une année d'orbite (Escoubet et al., 1997).

Nous avons également étudié la corrélation de ces observations avec l'activité géomagnétique à travers les variations des indices Kp, Dst et AE.

VI.1 Terminologie et proportion des différentes observations

Avant de présenter les occurrences des différentes émissions observées dans la plasmasphère, rappelons brièvement leurs caractéristiques spectrales à travers une étude d'événement.

Nous pouvons voir (Figure 6.1) le spectrogramme des données de WHISPER lors de la traversée du 17 mars 2004. Les satellites traversent l'équateur magnétique autour de 21:30 TU. Cette traversée est associée à l'observation d'ondes à $3/2 f_{ce}$ tel que surligné sur le spectrogramme par le carré blanc. Nous notons également des ondes à $1.1 f_{ce}$ autour de 21:11 TU, qui s'étendant à des latitudes plus élevées (-11°). Enfin nous pouvons remarquer des ondes aux multiples de la gyrofréquence électronique au-dessus de la fréquence plasma f_p , la cinquième harmonique étant pointée par la flèche blanche autour de 22:00 TU.

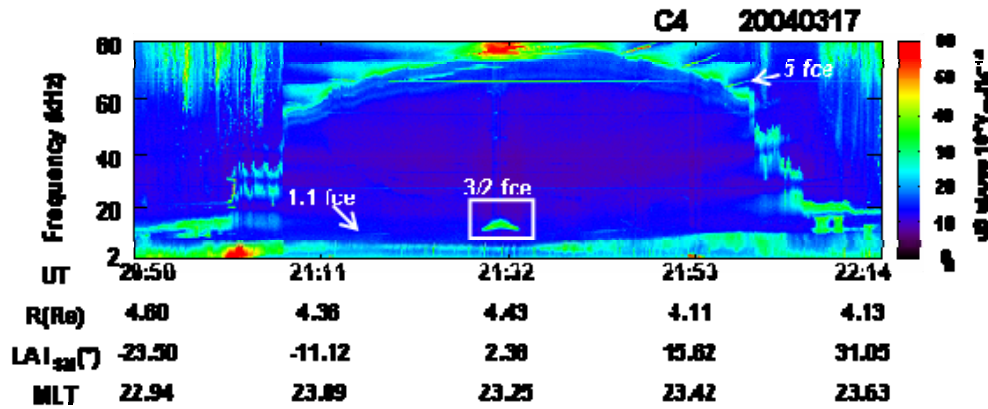


Figure 6.1: Rappel des différentes ondes observées dans la région de la plasmasphère : les émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont encadrées par un carré blanc, les émissions aux $1.1 f_{ce}$ surlignées par une flèche blanche, la cinquième harmonique à $5f_{ce}$ surlignée par une flèche blanche.

Les amplitudes de ces ondes sont variables, les plus intenses étant les émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$. Notons que les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ peuvent être observées avec un nombre variable d'harmoniques (El-Lemdani Mazouz et al., 2006). Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 5, ce nombre dépend de la manière dont les satellites CLUSTER traversent la plasmasphère.

Après avoir rappelé les signatures spectrales des ondes qui nous intéressent et qui sont observées dans la plasmasphère, nous présentons une étude statistique de celles ci. Nous montrons tout d'abord les occurrences de chaque type d'émission observé, puis nous présentons une étude statistique plus détaillée sur les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$

(émissions les plus intenses), sur les émissions aux $n(1.1) f_{ce}$ et enfin sur les émissions aux nf_{ce} qui n'ont jamais été observées auparavant.

Pour cette étude statistique, trois années de données (2002-2003-2004) enregistrées par l'instrument WHISPER autour du périégée (localisé à $4 R_i$) sont utilisées. Nous allons analyser les données et séparer les observations selon les différents types d'émissions observées. Sur les trois années de données étudiées et en tenant compte de la période de l'orbite (57 heures), nous avons au total 461 passages (par satellite) au périégée, couvrant tous les secteurs MLT.

Les quatre satellites CLUSTER, qui sont dans une configuration rapprochée, vont traverser les mêmes régions en moins d'une heure. Ce délai est inférieur aux temps caractéristiques de la dynamique de la plasmasphère. En effet, le temps de corotation des larges structures de la plasmopause est supérieur à trois heures et inférieur à trois jours (voir Pierrard et Cabrera, 2005). Nous pouvons donc remarquer qu'il n'y a pas de différence majeure entre les observations du premier et du dernier satellite lors d'un même passage au périégée. A contrario, des changements dans la plasmasphère sont attendus entre deux passages successifs au périégée.

Pour cette étude statistique, nous avons choisi de traiter les données d'un seul satellite sur une longue durée au lieu de traiter les données des quatre satellites sur une plus courte durée. Le satellite C3 a été sélectionné, avec un total de 461 passages. Sur ces passages, l'instrument WHISPER ne fonctionnant pas toujours, un total de 74 passages où les données ne sont pas accessibles est comptabilisé. Une base de données de 387 passages au périégée du satellite C3 avec données accessibles est donc analysée.

Les passages au périégée sont eux divisés en trois groupes selon le type d'émission observée : ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ et ondes aux nf_{ce} . Cette différentiation se fait de façon visuelle sur les spectrogrammes de données WHISPER. Le graphique de la Figure 6.2 montre les différentes proportions d'ondes observées. Notons que durant le même passage au périégée les trois catégories d'ondes peuvent être observées simultanément. Les occurrences de chaque type d'émissions sont données dans ce qui suit :

1. Observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$: 264 événements, labellisés « EQ », soit 68% du total d'observations. Sur ces 264 évènement, 18% se présentent sous forme

monotonique (observation d'une seule harmonique) et 82% sous forme multi harmonique.

2. Observations d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$: 227 évènements, labélisés « H », soit 58% du total d'observations. Ces ondes sont observées à des latitudes élevées.
3. Observation d'ondes aux nf_{ce} : 30 évènements, labélisés « M », soit 8% du total d'observations.

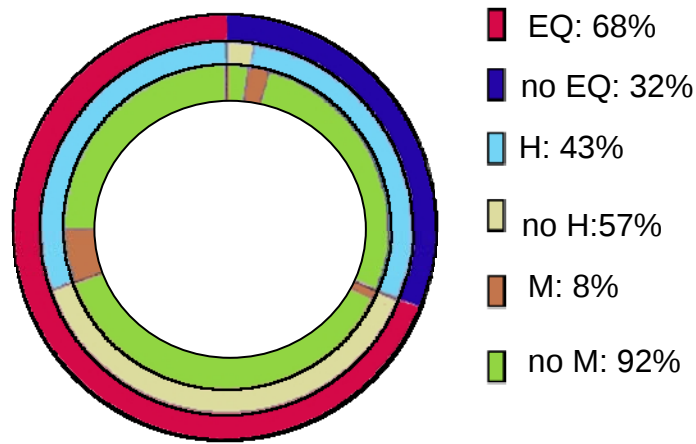


Figure 6.2: Proportion des différentes catégories d'émissions observées ; le label « EQ » indique l'observation d'ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$, « NEQ » indique la non observation d'ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$, de même pour les ondes à $n(1.1)f_{ce}$ labélisées « H » et les ondes à nf_{ce} labellisées « M ».

Les émissions équatoriales sont les émissions les plus communément observées, suivies par les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$; les émissions aux nf_{ce} étant les plus marginales. Nous allons voir maintenant quelles sont les occurrences de chaque type d'observations associées aux autres, en différentiant tout d'abord par rapport à l'observation ou non des émissions aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$.

Le Tableau 6.1 rassemble les différentes occurrences croisées : observations ou non d'émissions équatoriales, associées ou pas aux émissions aux $n(1.1)f_{ce}$, qui sont associées à leur tour ou pas aux émissions aux nf_{ce} . Le plus souvent, les émissions équatoriales ne sont pas associées à des observations simultanées d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$.

En effet, 57% des passages avec observation des émissions équatoriales ne sont pas associés aux $n(1.1) f_{ce}$. De plus 90% des passages où l'on n'observe pas d'émissions équatoriales (labélisées NEQ), sont associés à des observations d'émissions aux $n(1.1) f_{ce}$. Les émissions aux nf_{ce} sont, elles, plus marginales, et sont le plus souvent associées à l'observation simultanée d'émissions équatoriales et d'émissions aux $n(1.1) f_{ce}$ avec une proportion de 18%.

EQ 264 evt 68%	H 114 evt 43%	M 21 evt 18,%
		NM 93evt 82%
	NH 150 evt 57%	M 4 evt 3%
		NM 146evt 97%
NEQ 123 evt 32%	H 113 evt 92%	M 4evt 4%
		NM 109evt 96%
	NH 10 evt 8%	M 1 evt 10%
		NM 9evt 90%

Tableau 6.1: Classification des différents passages au périgée. Proportion des différentes observations, discrimination initiale par rapport aux émissions équatoriales, puis « sous-catégories » des autres observations d'ondes. Normalisation par rapport au total des passages au périgée, pour les émissions équatoriales, puis normalisation par rapport au total de la catégorie principale.

La Figure 6.3 représente le pourcentage de chaque catégorie avec observation ou pas d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ (labellisée H et NH) en fonction des différentes catégories selon l'observation où pas d'ondes EQ, et selon leur type : mono harmonique ou multi harmonique).

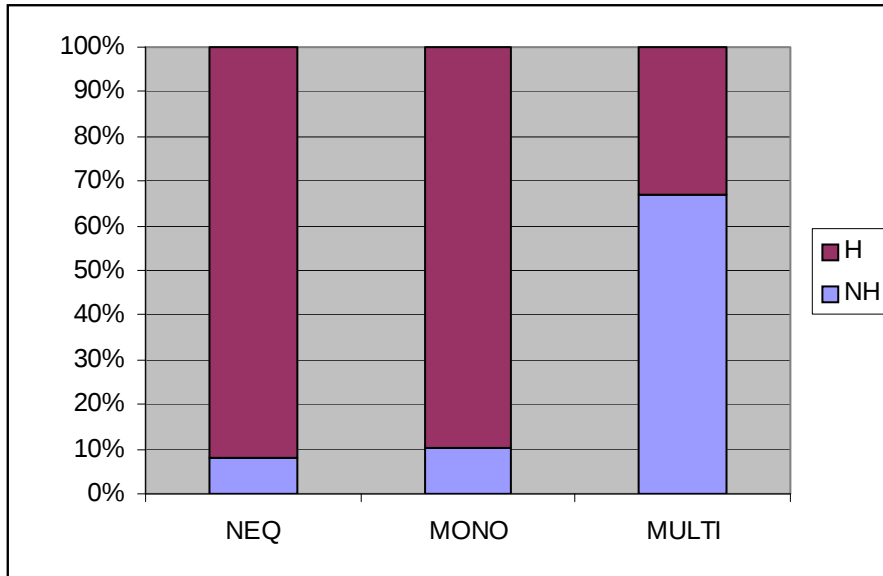


Figure 6.3: Pourcentage des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ labellisées H, selon les catégories par rapport aux émissions équatoriales : « NEQ » pour la non observation, « MONO » pour l'observation d'une émission mono harmonique, et « MULTI » pour une observation d'émission multi harmonique.

Les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ sont le plus souvent associées à des « non » observation d'émissions équatoriales, ou alors à l'observation d'une seule harmonique avec plus de 90% dans chaque catégorie, alors que celles-ci sont associées à une observation d'ondes équatoriales multi harmoniques aux $(n+1/2)f_{ce}$ pour seulement 30% des cas. Nous verrons par la suite que la distance à la plasmopause va jouer un rôle, à la fois sur le nombre d'harmoniques observées, mais également sur le type d'observation.

En résumé, nous avons vu que sur les trois années de données étudiées, les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont celles qui sont le plus souvent observées, ce qui en fait un phénomène courant dans la région équatoriale de la plasmasphère. Leur non observation ou l'observation d'ondes sous forme d'une seule harmonique est fortement corrélée avec la présence d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ qui s'étendent à des latitudes plus élevées. Ces émissions

aux $n(1.1) f_{ce}$ semblent donc être l'autre forme d'échange d'énergie entre les particules dans ces régions. Les émissions aux nf_{ce} sont elles plus marginales et semblent répondre à des conditions bien particulières d'apparition.

VI.2 Etude statistique sur les émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$

Dans cette partie, nous allons présenter l'étude statistique concernant les émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$, après avoir vu que c'était un phénomène courant dans la région équatoriale de la plasmasphère aux latitudes de CLUSTER. Nous allons rappeler rapidement la méthode de détection automatique utilisée pour traiter tous les passages au périgée de notre base de données, puis nous allons étudier leur répartition selon les différents secteurs MLT et leur dépendance par rapport à la latitude magnétique.

Nous allons aussi étudier l'intensité de ces émissions selon les différents secteurs MLT. Nous cherchons à voir si celles-ci sont assez intenses pour pouvoir être à l'origine de la précipitation de particules créant le phénomène des aurores diffuses.

L'influence de la fréquence plasma, sur l'apparition de ces émissions et sur l'intensité de celles-ci va être mise en évidence.

VI.2.1 Rappel sur la méthode de détection automatique

Vu la grande quantité de données à traiter sur tous les passages au périgée pour la période 2002-2004 (387 passages avec données disponibles), il a été nécessaire de mettre en place une méthode de détection « semi automatique » des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$. Cette méthode permet de déterminer les caractéristiques spectrales de ces émissions (fréquence, largeur de bande et intensité) et d'étudier leur position selon les différents temps locaux magnétiques et leur extension en latitude magnétique.

Comme nous l'avons signalé dans la Partie 4.2, cette procédure est basée sur le principe de détection des maximas d'intensité. Cette méthode combine un traitement manuel et un traitement automatique. La première étape de traitement, manuelle,

consiste à répertorier tous les passages au périgée et à vérifier de façon visuelle sur les spectrogrammes la présence ou non d'émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ près de l'équateur magnétique. Cette vérification visuelle permet aussi de noter le nombre d'harmoniques observées, ce qui est très utile dans la suite de notre travail puisqu'elle permet de distinguer les émissions «réelles» aux $(n+1/2)f_{ce}$ des répliques parasites qui peuvent apparaître lors des saturations. Comme nous l'avons montré dans la Partie 5 et sur plusieurs événements, si il y a saturation, celle-ci ne va pas influencer sur l'ensemble des spectres, ce qui va permettre de distinguer les fréquences aux $(n+1/2)f_{ce}$ des répliques parasites (réputées être autour des multiples de 10kHz). Les événements « perturbés » par des répliques parasites vont donc être pris en compte.

La partie manuelle permet donc de répertorier les passages au périgée avec présence d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et de noter leur temps d'observation qui correspondent aussi aux temps de passage approximatif à l'équateur magnétique t_{eq} .

Cette première étape va servir de paramètre d'entrée pour la détection automatique. Comme on l'a vu dans la Partie 4.2, la méthode des maxima d'intensité est appliquée sur un intervalle de 10 minutes autour de l'instant de traversée de l'équateur magnétique, et ce pour tous les événements où l'on a noté la présence d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$. Les caractéristiques de chaque harmonique observée sont étudiées, les fréquences, largeurs de bande et intensités de ces émissions sont donc notées sur tous les temps de spectre des observations. Dans le cas où l'harmonique présente des sous-structures, le pic le plus intense est pris en compte.

Un fichier par événement est ainsi créé, et après exploitation, les temps de début et de fin de chaque harmonique sont répertoriés, ainsi que leur temps de référence t_{max} qui est défini comme l'instant où l'intensité et la largeur de bande atteignent leur valeur maximale.

Un listing de tous les événements ainsi que de leur temps caractéristiques est créé, et cela va nous servir pour l'exploitation des résultats concernant les positions en secteur MLT et en latitude magnétique.

VI.2.2 Dépendance à la latitude magnétique

Dans cette partie, nous allons étudier la dépendance des évènements aux $(n+1/2)f_{ce}$ à la latitude magnétique.

Nous avons déjà noté que les satellites CLUSTER ont pour avantage de traverser de façon rapide et bien définie l'équateur magnétique. La Figure 6.4 nous donne les positions des satellites CLUSTER à l'instant de traversée de l'équateur magnétique t_{eq} dans le repère $X_{SM} - Z_{SM}$.

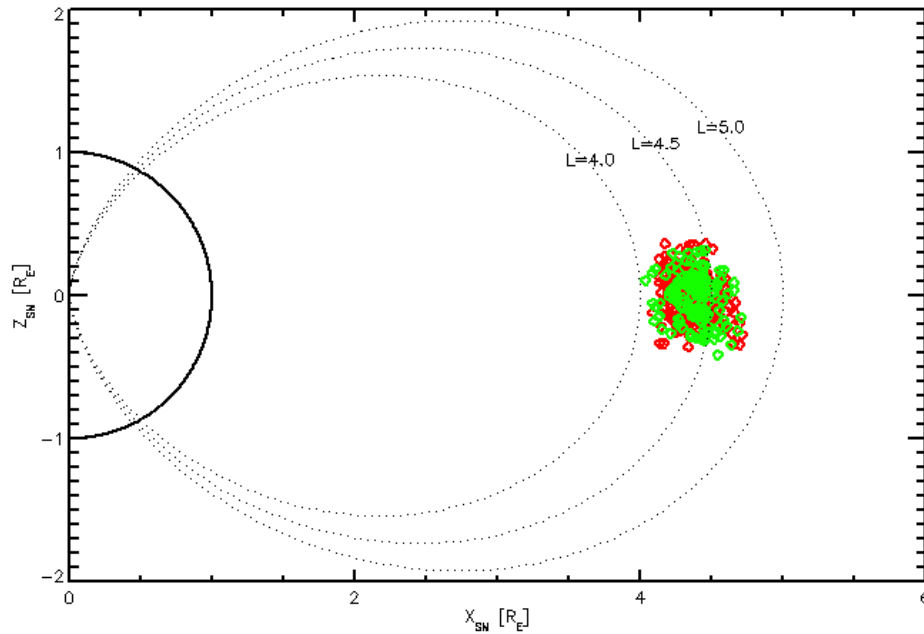


Figure 6.4: Positions des satellites CLUSTER dans le plan $X_{SM} - Z_{SM}$ lors de la traversée du péricée : en rouge, passage avec observation d'ondes à $(n+1/2)f_{ce}$, en vert, passages au péricée sans observation d'ondes à $(n+1/2)f_{ce}$. Les lignes de champ magnétique dipolaires sont représentées à titre indicatif à 4.0, 4.5, et 5.0 R_t respectivement.

Comme on peut le voir à l'altitude atteinte par les satellites autour du péricée (près de $4R_t$) Les satellites CLUSTER vont traverser l'équateur magnétique de façon claire et non ambiguë avec observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ ou non observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ (en rouge et vert respectivement sur la Figure 6.4).

VI.2.2.a Latitude du maximum d'intensité

Nous allons voir maintenant à quelles latitudes particulières sont observées les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$, en prenant comme temps caractéristique l'instant $t_{\max}$ où l'intensité de l'émission observée atteint son maximum. La latitude magnétique est déterminée à cet instant en utilisant le modèle de Tsyganenko et Stern (1996).

Nous avons représenté sur la Figure 6.5 les pourcentages d'événements observés à chaque latitude magnétique, les variations de cette dernière allant de -6° à 6° de latitude magnétique.

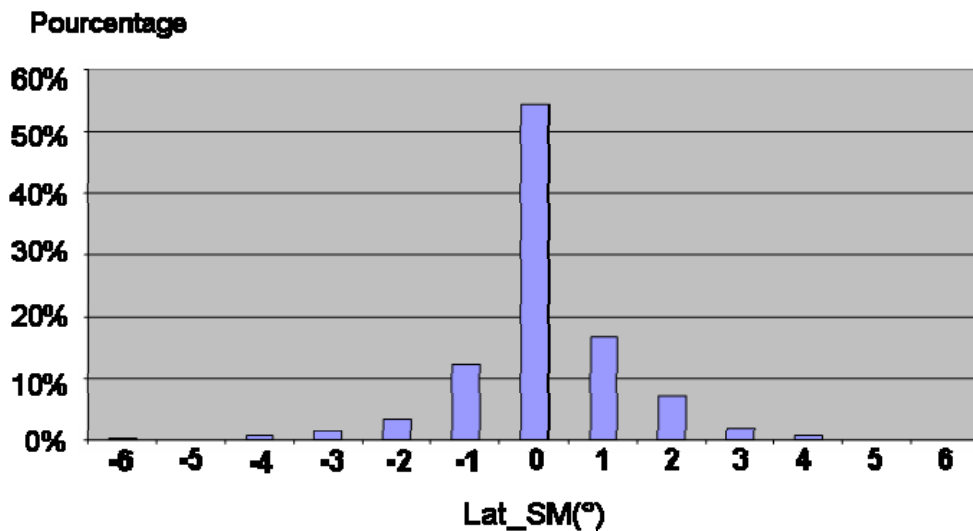


Figure 6.5: Pourcentage d'événements à chaque latitude magnétique (déterminée selon le modèle de Tsyganenko et Stern (1996)).

Les valeurs de la latitude magnétique sont arrondies à leur valeur entière la plus proche. Plus de 60% des événements ont une latitude autour de 0° calculée au temps de référence. La valeur moyenne étant de 0.2° avec une déviation standard de 1.5° . Moins de 12% des événements ont une latitude magnétique supérieure à 2° en valeur absolue. Nous pouvons noter le fort confinement à l'équateur magnétique des observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, conformément aux résultats des observations précédentes (Christiansen et al., 1978b ; Kennel et al., 1970 ; Roeder et Koons, 1989).

VI.2.2.b Extension en latitude

Des études d'événements (présentées dans le Chapitre 5) ont montré que l'extension en latitude magnétique de chaque observation à $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$, déterminée à partir des temps de début et temps de fin de la première bande gyroharmonique, est comprise dans l'intervalle $[-3^\circ, +4^\circ]$. Ce qui montre une extension totale sur moins de 10° en latitude magnétique. Toutefois nous n'avons pas eu le temps de voir systématiquement cette extension en latitude magnétique sur toute notre base de données.

VI.2.2.c Largeur de bande

Les différentes études d'événements décrites dans le Chapitre 5, ont révélé que, la largeur de bande à mi-hauteur des différentes harmoniques, labélisée Δf , varie en fonction de la latitude magnétique atteignant une valeur maximale près de l'équateur magnétique. Celle-ci est plus importante pour la première bande gyroharmonique, le ratio $\Delta f/f$ atteignant une valeur de 70% en moyenne près de l'équateur magnétique et 50% pour la seconde harmonique.

De plus, la position exacte en fréquence des harmoniques observées ne se situe pas toujours exactement au milieu de l'intervalle entre deux gyrofréquences électroniques successives. Le rapport entre la fréquence du pic principal et la gyrofréquence électronique varie en fonction de la latitude magnétique. Cette variation est généralement symétrique par rapport à l'instant du maxima.

VI.2.3 Dépendance en MLT

Nous allons maintenant considérer les positions dans le plan R-MLT (système de coordonnées SM). Comme précédemment mentionné, les données du satellite C3 sont analysées. L'occurrence des émissions aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ en fonction du secteur MLT est représentée sur la Figure 6.6.

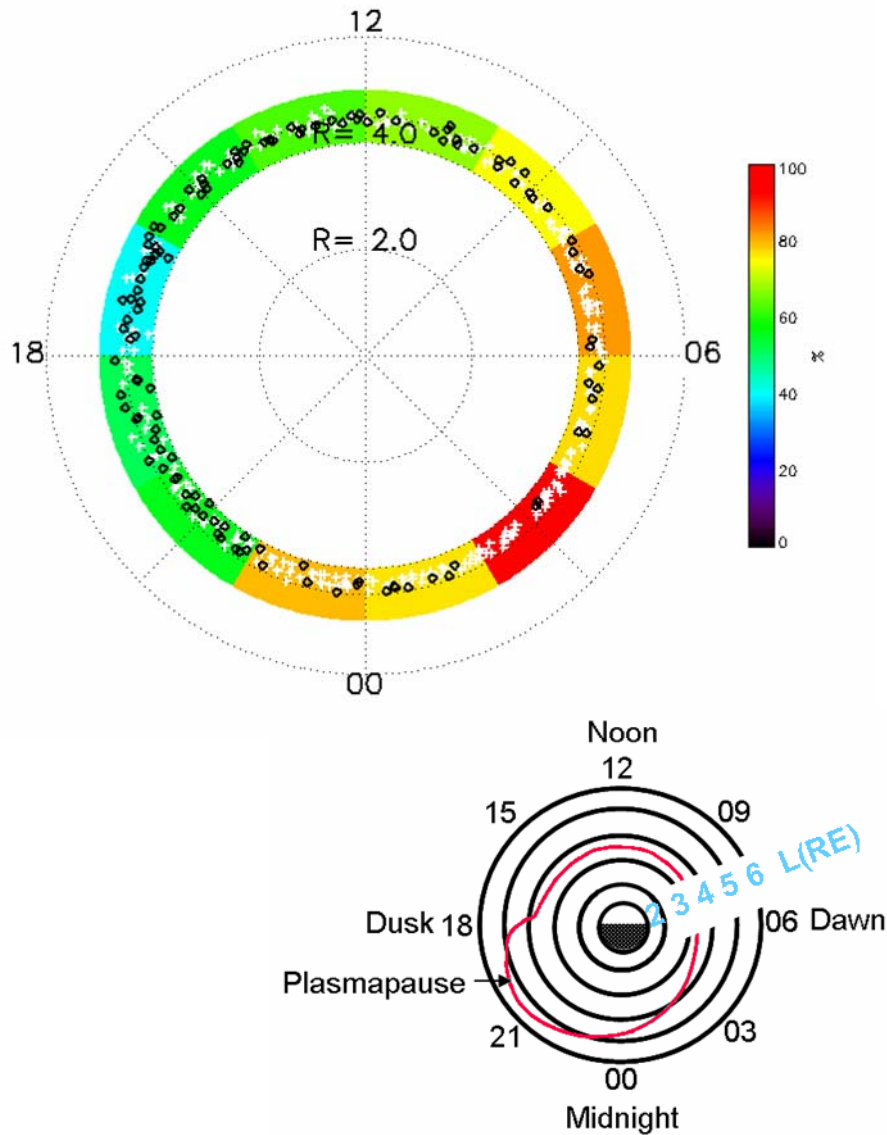


Figure 6.6: Occurrence des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ dans un plan R-MLT. Positions de traversée de l'équateur magnétique avec observations ou pas des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ respectivement avec croix blanches et cercles noir. Modèle de plasmapause dans le plan équatorial représentée en bas à droite de la figure (d'après Carpenter, 1970).

Sur cette figure, 12 cellules de dimension $1 R_t \times 2$ heures MLT sont représentées en coordonnées polaires. Le code couleur indique le nombre de passages dans chaque cellule avec observation d'émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ normalisé par le nombre de passages du satellite dans chaque cellule (avec données disponibles). Etant donné que les passages où les données ne sont pas disponibles sont équi-répartis en temps local, notre

base de données couvre tous les secteurs MLT de façon égale. Notons aussi que le nombre d'événements exploitables est significatif dans tous les secteurs MLT.

Toutes les cellules sont centrées autour de 4Rt qui est la distance approximative de C3 à l'instant de traversée de l'équateur magnétique. Les positions précises des satellites CLUSTER sont indiquées par les croix blanches et les cercles noirs correspondants respectivement aux passages avec observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ ou pas.

Notons que les occurrences atteignent des valeurs significatives (40% au minimum) dans tous les secteurs MLT. Plus précisément, les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont observées avec une plus grande probabilité dans le secteur aube (03-09 MLT) et avec une plus faible probabilité dans le secteur crépuscule (16-18 MLT). Ce qui, comme on l'a vu dans le Chapitre 2, est en accord avec des résultats obtenus à l'aide de précédentes missions (Røeder et Koons, 1989; Christiansen et al., 1978b).

Cette asymétrie aube-crépuscule est identique à l'asymétrie de la plasmopause équatoriale, ce qui laisse penser à une relation entre les occurrences observées et la position de la plasmopause équatoriale. Nous allons donc chercher à voir si les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont liées à la frontière qu'est la plasmopause et à quelle distance de celle-ci les émissions interviennent-elles. Nous avons choisi d'évaluer cette distance, d'abord avec un modèle empirique donnant la position de la plasmopause (Carpenter, 1970), ensuite par un estimateur représenté par la valeur de la fréquence plasma mesurée par l'instrument WHISPER à la traversée de l'équateur magnétique.

VI.2.3.a Evaluation de la distance à la plasmopause

La comparaison de la position de C3 au périégée au modèle empirique de Carpenter, représenté en bas de la Figure 6.6 montre que les satellites sont proches de la plasmopause dans tous les secteurs MLT à l'exception du bulge (18-23 MLT).

Comme nous l'avons vu, les occurrences plus faibles dans le secteur crépuscule et plus élevées dans le secteur aube peuvent s'expliquer par la proximité de la frontière qu'est la plasmopause modélisée par Carpenter (1970). Néanmoins, en comparant les occurrences dans le secteur midi-minuit, on peut voir qu'à une distance égale entre les satellites et la plasmopause équatoriale, nous obtenons des occurrences plus élevées

dans le secteur minuit comparativement au secteur midi. La proximité de la plasmopause modélisée par Carpenter ne peut donc pas expliquer ces différences.

Nous pouvons aussi caractériser la distance à la plasmopause à chaque passage au périégée par la valeur de la fréquence plasma équatoriale f_{p-eq} mesurée par l'instrument WHISPER. En effet, les mesures de fréquence plasma dans la région équatoriale par WHISPER sont parfaitement adaptées : les valeurs de la fréquence plasma dans la région équatoriale varient de 40 à 80 kHz, ce qui équivaut à des densités allant de 20 à 80 cm⁻³. Cette gamme de densité est comprise dans la gamme 20-200 cm⁻³ qui caractérise le saut de densité en forme de « genou » (en Anglais, knee) dans le profil de densité (modèle de Carpenter, 1970).

Les valeurs de la fréquence plasma équatoriale sont déterminées à travers une inspection visuelle des spectrogrammes WHISPER au périégée. A chaque passage au périégée, la valeur de la fréquence plasma près de l'équateur magnétique est mesurée avec une précision de 5 kHz. Sept valeurs allant de 30 à >80 kHz sont affectée. La valeur 30 kHz indiquant des valeurs de fréquence plasma allant de 25 à 35 kHz et ainsi de suite, 80 kHz indiquant des valeurs de f_{p-eq} entre 75 et 80 kHz. Finalement la classe >80kHz indique les cas où la valeur de la fréquence plasma équatoriale est supérieure à la limite de résolution de WHISPER.

La valeur $f_{p-eq} = 60$ khz, a été choisie comme l'indicateur du genou de la plasmopause ; en effet celle-ci est équivalente à une valeur de densité 45 cm⁻³ située au milieu du saut de densité de la plasmopause.

Toutes les variations des valeurs de fréquence plasma équatoriale sont représentées sur la Figure 6.7 en fonction des secteurs MLT. Les occurrences relatives du nombre de passage au périégée dans chaque classe, ayant pour fréquence plasma équatoriale la valeur f_{p-eq} , sont représentées par les barres de différentes couleurs et longueurs.

Notons que les valeurs de f_{p-eq} couvrent un grand intervalle de fréquence et ce sur tous les secteurs MLT, montrant clairement une dépendance en temps magnétique local. En effet, les occurrences de valeurs élevées de f_{p-eq} ($f_{p-eq} > 60$ kHz) varient selon les différents secteurs MLT. Cette variation est directement reliée à la morphologie de la plasmopause moyenne montrée Figure 6.6 avec l'asymétrie typique « aube-crêpuscule ».

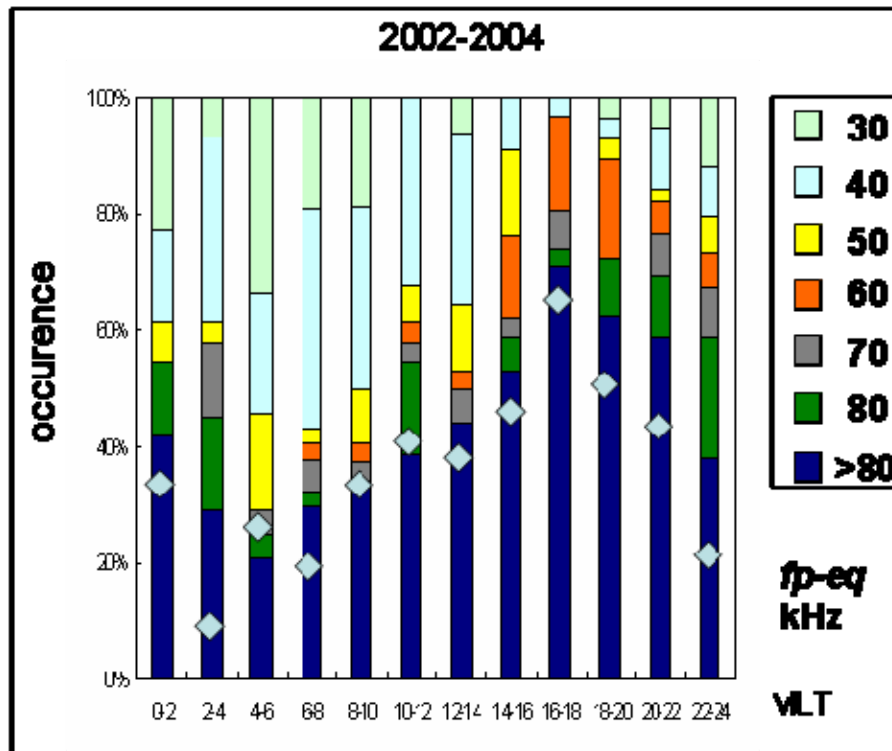


Figure 6.7: Occurrence relative des valeurs de la fréquence plasma équatoriale mesurée par WHISPER à l'instant de la traversée de l'équateur magnétique, sur les différents secteurs MLT. Les losanges bleus indiquent les pourcentages de non événements lors de la traversée.

Lorsque le satellite C3 est situé en dehors de la plasmapause (dans les secteurs aube et jour), alors f_{p-eq} est avec une grande probabilité inférieure à 60 kHz. Et lorsque CLUSTER est situé à l'intérieur de la plasmapause (bulge et secteur minuit) alors f_{p-eq} est avec une grande probabilité supérieure à 60 kHz. Le paramètre f_{p-eq} va donc être utilisé comme un estimateur de la distance à la plasmapause et sera utilisé dans la suite afin de déterminer les caractéristiques des ondes aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ (occurrence, intensité, nombre d'harmoniques observées) en fonction de ce paramètre. Un des avantages de l'utilisation de cet estimateur est qu'il est directement lié aux observations de WHISPER et qu'il va refléter instantanément les variations de la position de la plasmapause dues à l'activité géomagnétique.

VI.2.3.b Occurrence / distance à la plasmopause

Après avoir noté l'importance de la distance à la plasmopause pour l'observation des ondes à $(n+1/2)f_{ce}$, nous allons comparer avec plus de détails la distribution de l'estimateur f_{p-eq} et l'occurrence de ces ondes.

Nous avons choisi de montrer ici les occurrences de « non événements », représentée avec les losanges bleus dans chaque secteur MLT. Les proportions de valeurs élevées de fréquence plasma $f_{p-eq} > 80$ kHz coïncident parfaitement avec les occurrences de non événements, ce qui n'est pas un pur hasard. En effet, toutes les occurrences des non événements sont observées pour des valeurs de fréquence plasma équatoriale $f_{p-eq} > 80$ kHz, où alors $f_{p-eq} = 80$ kHz. Nous pouvons aussi voir (Tableau 6.2) que toutes les valeurs de fréquence plasma « basses » $f_{p-eq} \leq 60$ kHz correspondent à des passages avec observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ dans les différents secteurs MLT. Nous pouvons donc dire que les valeurs élevées de fréquence plasma équatoriale f_{p-eq} , indiquant que CLUSTER se situe à l'intérieur de la plasmopause, ne sont pas favorables à l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Notons également que les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont associées à une large gamme de valeurs de fréquence plasma équatoriale, quelque soit le secteur MLT considéré. Plus précisément, dans le secteur aube, l'occurrence élevée des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ correspond à de faibles valeurs de fréquence plasma équatoriale (CLUSTER en dehors de la frontière de la plasmopause). Dans le secteur bulge, la faible occurrence des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ peut être attribuée aux valeurs élevées de fréquence plasma équatoriale dans ce secteur.

En revanche, quelques événements d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont observés avec des valeurs de fréquence plasma élevées, i.e. à l'intérieur de la frontière de la plasmopause, spécialement dans le secteur nuit (près de minuit), comme si l'écrantage des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ était moins efficace dans ce secteur. Ce comportement peut être expliqué par l'occurrence élevée de petites structures de densité dans cette partie de la plasmasphère (Darrouzet et al., 2004). L'importance de ces petites structures de densité a été mise en évidence dans le Chapitre 5 avec l'évènement du 2 Juillet 2004.

L'injection d'électrons provenant du feuillet de plasma dans le secteur minuit peut aussi être associée à l'apparition des $(n+1/2)f_{ce}$ dans ce secteur (Horwitz, 1986).

VI.2.3.c Influence de la fréquence plasma équatoriale sur le nombre d'harmoniques observées

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 5, la valeur de la fréquence plasma va jouer un rôle sur le nombre d'harmoniques observées. Plus grande est la valeur de la fréquence plasma, moins on observe d'harmoniques. Nous allons maintenant chercher à voir si cette propriété se vérifie aussi pour notre étude statistique.

Comme on l'a vu, 82 % des observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont multi-harmoniques, les observations mono-harmoniques apparaissant avec différentes proportions selon les secteurs MLT. En étudiant le rapport mono/multi observation, nous constatons que ce rapport est plus élevé dans le secteur crépuscule et plus faible dans le secteur aube (voir tableau 6.2). L'étude plus détaillée des événements mono-harmoniques montre que ces émissions sont régulées par la distance radiale à la plasmapause, indiquée dans notre travail par la valeur de fréquence plasma équatoriale.

Nos observations semblent confirmer le scénario suivant (voir Figure 6.8) :

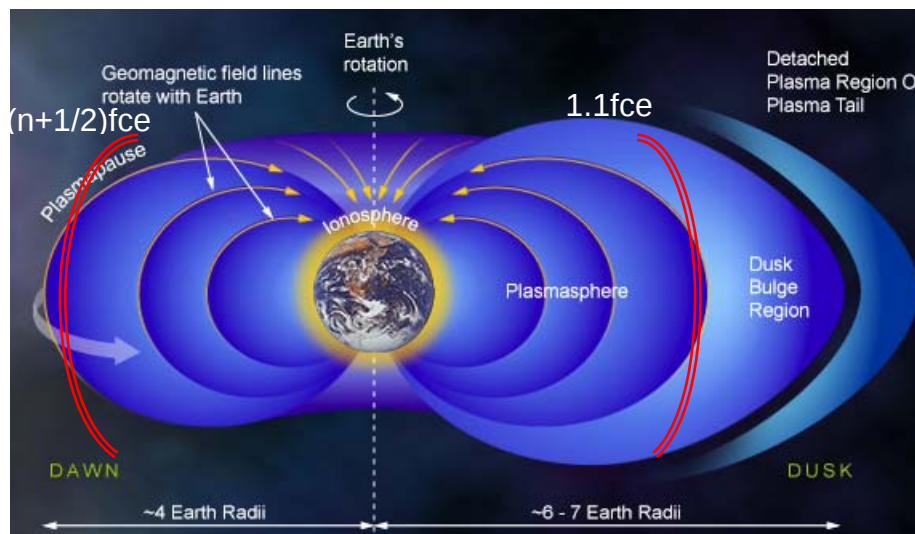


Figure 6.8: Figure schématisant les types d'ondes observées selon la distance à la plasmapause équatoriale.

Un observateur qui se déplace de la plasmasphère interne vers des régions extérieures ne va tout d'abord pas observer d'émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$ (à l'intérieur de la plasmopause, et pour des valeurs de $f_{p-eq} > 80$ kHz) mais va plutôt observer les ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ qui s'étendent à des latitudes plus élevées. Cet observateur va ensuite observer les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ sous forme mono-harmonique, puis les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ sous forme multi-harmoniques pour des valeurs de $f_{p-eq} < 60$ kHz. De plus, comme indiqué dans le Tableau 6.2, la proportion de $f_{p-eq} < 60$ kHz n'excède pas 5% pour les émissions mono-harmoniques, alors que pour les émissions multi-harmoniques, elle atteint 60%. Nous pouvons aussi noter que tous les passages au périgée avec $f_{p-eq} < 60$ kHz sont associés à des observations d'ondes équatoriales, sous forme multi-harmonique dans la majeure partie des cas.

L'influence de la valeur de fréquence plasma équatoriale peut être interprétée en considérant que le rapport plasma chaud / plasma froid est un facteur important pour le processus de génération : ce rapport augmentant avec la distance radiale, la source plasma ionosphérique étant progressivement remplacée par la source du feuillet de plasma, ce qui favorise le grand nombre d'harmoniques observées (Kennel et Ashour-Abdalla, 1982).

	Occurrence			$f_{p-eq} \leq 60 \text{ kHz}$				Intensity h1 $\geq 10^{-4} V_{rms} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$		
	EQ	3/2	Multi	tot	EQ	3/2	Multi	EQ	3/2	Multi
Aube 03-09 MLT	81%	7%	74%	60%	60%	0%	60%	70%	0%	70%
Midi 09-15 MLT	64%	9%	55%	48%	48%	2%	46%	51%	2%	49%
Crépuscule 15-21 MLT	48%	15%	33%	24%	24%	5%	19%	41%	5%	36%
Minuit 21-03 MLT	77%	19%	58%	38%	38%	0%	38%	59%	0%	59%

Tableau 6.2: Occurrence des émissions équatoriales aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ dans les différents secteurs (aube, midi, crépuscule, minuit) à partir des 387 passages au périgée avec données disponibles. Colonne occurrence, occurrence des passages avec événement : EQ, 3/2, multi, faisant référence à tous les passages avec observation d'ondes aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$, émissions mono harmoniques et émissions multi bande respectivement. Colonne " $f_{p-eq} < 60 \text{ kHz}$ ": occurrence de tous les passages avec fréquence équatoriale modérée, listées dans la sous-colonne « tot », comparaison aux passages avec observation d'ondes équatoriales des trois catégories définies plus haut. Colonne intensité : occurrence des événements intenses pour la première bande harmonique, labélisée h1, données pour les 3 catégories décrites plus haut.

VI.2.4 Intensité des émissions

Comme nous l'avons noté dans le Chapitre 2, l'un des intérêts de l'étude de l'intensité des ondes aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ est de répondre à la question de l'origine des aurores diffuses : ces émissions sont-elles suffisamment intenses pour être la cause de la précipitation de particules générant celles-ci ? Afin de répondre à cette question du point de vue de CLUSTER, nous avons effectué une étude statistique sur l'intensité de la première bande gyroharmonique, qui est généralement la plus intense (El-Lemdani Mazouz et al., 2006).

Pour cela, nous avons utilisé les résultats du traitement automatique que nous avons présenté plus haut, où les fréquences et intensités des émissions aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ sont calculées sur la totalité de l'intervalle d'observation, les valeurs atteintes lorsque l'intensité est maximale sont prises pour référence.

La distribution des intensités des événements selon le secteur MLT est représentée sur la Figure 6.9, les intensités ont été divisées en cinq gammes allant de $1.10^{-7} V_{rms}.Hz^{-1/2}$ à $1.10^{-1} V_{rms}.Hz^{-1/2}$.

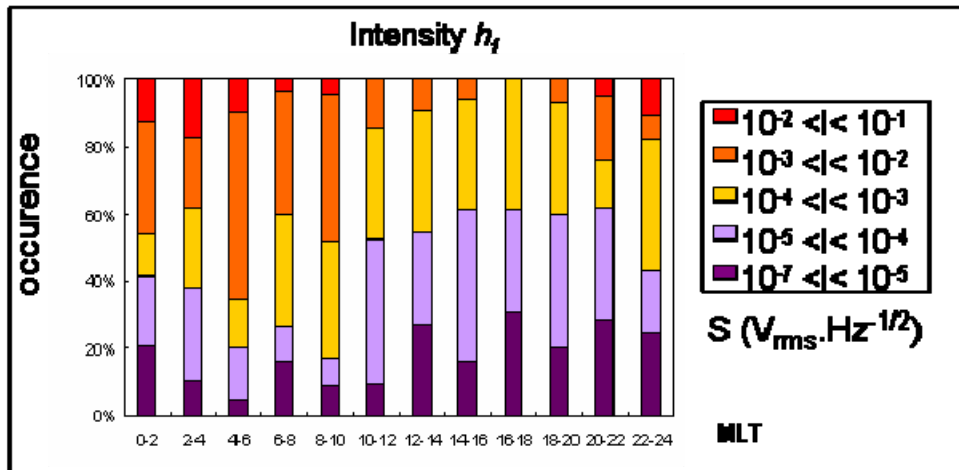


Figure 6.9: Distribution en MLT des intensités des ondes pour le pic principal de la première harmonique, l'intensité mesurée est divisée en cinq gammes allant du violet au rouge. S représente la densité spectrale de la différence de potentiel.

Considérons les événements avec une intensité supérieure à $1.10^{-4} \text{ V}_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2}$ comme étant des événements intenses. Leur proportion est autour de 57% du total des événements avec observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$. Les émissions les plus intenses apparaissent dans le secteur aube. Le pourcentage d'événements intenses atteint 70% du total d'événements détectés dans ce secteur (Tableau 6.2). Les émissions les moins intenses apparaissent dans le secteur crépuscule, avec un pourcentage d'événements intenses de 41% sur le total d'observations dans ce secteur. Notons que le pourcentage d'intensité élevée coïncide avec le fort taux d'apparition des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Nous allons maintenant voir s'il y a une relation entre l'intensité des ondes mesurées et la fréquence plasma équatoriale, en comparant ces valeurs dans les différents secteurs MLT (Figures 6.9 et 6.7). La proportion d'événements intenses augmente avec la proportion de fréquence plasma équatoriale $f_{p-eq} \leq 60 \text{ kHz}$ dans tous les secteurs MLT.

Nous représentons de façon plus globale l'intensité du champ électrique mesurée pour différentes classes de la fréquence plasma équatoriale Figure 6.10. Les intensités ont diverses valeurs et vont de quelques $10^{-7} \text{ V}_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2}$ à quelques $10^{-2} \text{ V}_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2}$. Les étoiles rouges représentent les valeurs médianes dans chaque catégorie.

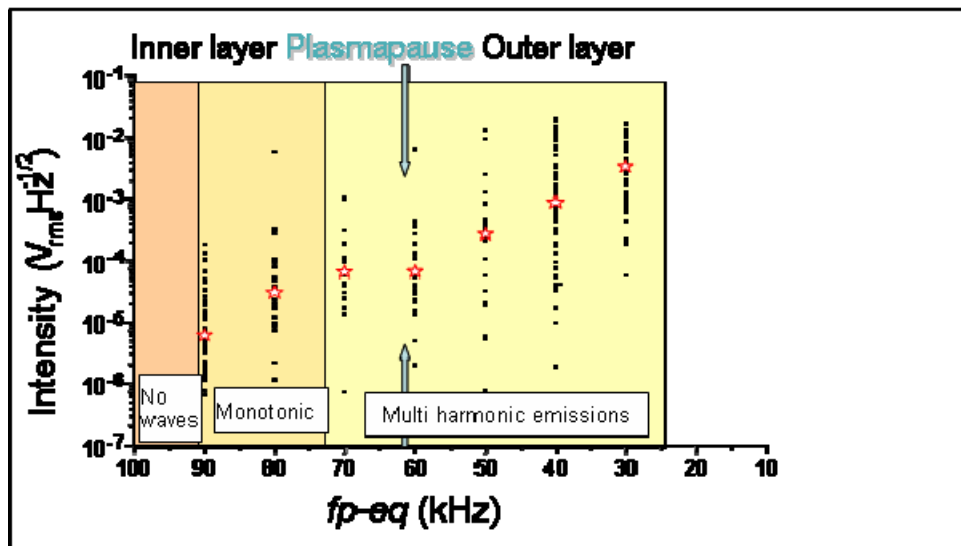


Figure 6.10: Distribution de l'intensité du champ électrique pour les différentes classes de fréquence plasma équatoriale. Les étoiles rouges indiquent les valeurs médianes. Trois domaines de fréquence plasma avec des signatures spectrales différentes sont définis, $f_{p-eq} > 90 \text{ kHz}$ pas d'observation, $70 \text{ kHz} < f_{p-eq} < 90 \text{ kHz}$ observations mono harmoniques, $f_{p-eq} < 70 \text{ kHz}$ émissions multi harmoniques.

Nous remarquons de façon globale une anti corrélation entre l'intensité mesurée et la fréquence plasma équatoriale, l'intensité diminuant avec la distance géocentrique à l'observation.

L'intensité des émissions multi-harmoniques est globalement plus intense que l'intensité des émissions mono-harmonique ; plus la valeur de la fréquence plasma équatoriale est faible, plus l'intensité mesurée est élevée. De plus, comme on l'a vu dans le Chapitre 5 avec une étude multipoints (événement du 27 mai 2003) dans un secteur MLT donné et sous des conditions géophysiques données, l'intensité des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ augmente avec la distance géocentrique, en même temps que le nombre d'harmoniques diminue. Nous remarquons la dispersion des valeurs des intensités pour chaque classe de valeur de fréquence plasma assignée.

Nous cherchons maintenant à comparer le taux d'émissions intenses à $I \geq 10^{-4} V_{rms}.Hz^{-1/2}$ aux valeurs faibles de fréquence plasma équatoriale dans les différents secteurs MLT. En comparant les secteurs aube et crépuscule ou alors aube et minuit, nous voyons que l'occurrence d'intensités élevées augmente avec l'occurrence de fréquence plasma faible, confirmant le comportement général montré sur la Figure 6.10. Une exception apparaît néanmoins quand on compare les secteurs midi et minuit, puisque l'occurrence des intensités élevées ($I \geq 10^{-4} V_{rms}.Hz^{-1/2}$) augmente de 51% dans le secteur midi à 59% dans le secteur minuit alors que le taux de $f_{p-eq} \leq 60$ kHz diminue allant de 48% à 38%. Finalement, l'intensité de la première bande gyro-harmonique est plus importante dans le cas d'observations multi-harmoniques, comparativement aux observations mono-harmoniques. La proportion des émissions mono-harmoniques intenses n'excède pas 2% du total des émissions avec $I \geq 10^{-4} V_{rms}.Hz^{-1/2}$, le taux le plus élevé d'observations mono-harmoniques intenses apparaît dans le secteur crépuscule.

Nous pouvons donc dire que la proximité de la plasmopause joue un rôle sur l'intensité des ondes observées, avec une exception dans le secteur minuit, où les ondes sont comparativement plus intenses, ce qui peut être expliqué par un rapport plus important entre le plasma chaud et le plasma froid dans ce secteur, où les populations viennent du feuillet de plasma. Le sondeur WHISPER est capable de calculer ce rapport (Trotignon et al., 2003), mais une étude statistique concernant cette quantité en fonction des différents secteurs MLT et de la densité équatoriale reste à faire.

Enfin, nous cherchons à comparer nos résultats concernant l'intensité de la première bande gyroharmonique à $3/2 f_{ce}$ aux résultats de GEOS (Belmont et al., 1983). Pour cela nous devons convertir nos intensités aux unités conventionnelles mV.m^{-1} . Comme on l'a vu dans le Chapitre 3, il est nécessaire de prendre en compte la longueur efficace de l'antenne pour convertir les données de WHISPER. Pour cela, nous utilisons l'équation 3.1 que l'on rappelle ici :

$$E_{\text{sin } e}(\text{V.m}^{-1}) = \frac{\sqrt{\Delta F(\text{Hz})}}{L_{\text{eff}}(\text{m})} S(V_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2})$$

On considère une valeur efficace d'antenne $L_{\text{eff}} = 53 \text{ m}$, valable pour des plasmas d'une longueur de Debye de 1m, une valeur typique dans la région externe de la plasmasphère (voir la Figure 6 de Beghin et al., 2005). Il est aussi nécessaire de prendre en compte les effets de modulation de spin qui vont influencer sur l'amplitude du signal. Néanmoins, et comme on l'a vu dans le Chapitre 5, pour les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$, le champ électrique est dans la direction perpendiculaire au champ magnétique, et comme dans la région équatoriale celui-ci est quasi parallèle au plan de spin, on peut négliger les effets de modulation de spin. Enfin, il est nécessaire d'évaluer la largeur de bande ΔF des émissions, et nous allons tout simplement considérer la valeur de la largeur de bande instrumentale. L'équation 3. 1 devient donc

$$E_{\text{sin } e}(\text{V.m}^{-1}) = 0.44 S(V_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2}) \quad \text{Eq 6. 1}$$

Cette conversion sous estime en général l'amplitude, puisque la largeur de bande de ces observations est généralement plus importante (autour de 3 kHz) comme on l'a vu dans le Chapitre 5.

Le résultat de référence de GEOS que nous avons présenté dans la Figure 2.10 du Chapitre 2, c'est-à-dire l'amplitude typique des ondes qui peuvent générer une diffusion angulaire des électrons est de 1mV.m^{-1} , les intensités mesurées par GEOS sont supérieures à cette valeur dans plus de 15% des cas. Ce résultat est obtenu à $L = 6.6 \text{ Rt}$, à

une latitude magnétique de 0° dans le secteur minuit (22-06 MLT) et en considérant une largeur de bande de 1 kHz.

L'intensité de 1 mV.m^{-1} convertie en unité de mesures de WHISPER donne une intensité $I = 2.25 \cdot 10^{-3} V_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2}$, en considérant une largeur de bande autour de 0.5 kHz. En corrigeant cette valeur en tenant en compte des différences dans les distances géocentriques (le minimum de l'amplitude des ondes variant en $L^{-1/2}$), le minimum d'intensité à atteindre est corrigé à $3 \cdot 10^{-3} V_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2}$, ce seuil est atteint dans plus de 32% des événements observés dans le secteur nuit. En prenant en compte une largeur de bande plus élevée (autour de 1 kHz), le pourcentage d'événements excédant le seuil est encore plus élevé. Ce résultat indique que les émissions intenses aux $3/2f_{ce}$ ($I \geq 3 \cdot 10^{-3} V_{\text{rms}}.\text{Hz}^{-1/2}$) sont observées avec une plus large proportion durant les passages au périgée de CLUSTER dans le secteur nuit, comparativement aux observations de GEOS et de SCATHA. Toutefois cette proportion reste insuffisante pour expliquer la diffusion d'électrons chauds, où des proportions encore plus importantes sont nécessaires (Lyons, 1974).

VI.2.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons vu quelques résultats statistiques concernant les émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées par WHISPER/CLUSTER au périgée. L'orbite de CLUSTER nous a permis de couvrir tous les secteurs MLT et de définir clairement la position de l'équateur magnétique. L'étude de trois années de données a permis d'effectuer une étude statistique significative des propriétés des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ en fonction de la latitude magnétique et du secteur MLT. Cette étude nous a également permis pour la première fois de qualifier la distance de l'observation par rapport à la plasmopause à travers les mesures de fréquence plasma équatoriale $f_{p\text{-eq}}$, les valeurs $f_{p\text{-eq}} \leq 60 \text{ kHz}$ indiquant que les satellites se situent à l'intérieur de la plasmopause.

Nous pouvons donc dire que les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont un phénomène courant observé dans tous les secteurs MLT, la condition $f_{p\text{-eq}} \leq 60 \text{ kHz}$ étant suffisante pour observer ces ondes. Ces émissions sont liées très étroitement à la latitude magnétique et

confinées dans l'intervalle $[-3^\circ, +4^\circ]$. La latitude du maximum d'intensité se situe toujours près de l'équateur magnétique. Le nombre d'harmoniques observées dépend de la manière dont les satellites traversent la région équatoriale.

Notons aussi que l'intensité de la première bande gyro-harmonique est généralement plus élevée que l'intensité des harmoniques supérieures.

La distribution en secteur MLT est étroitement liée à la forme non axy - symétrique de la plasmopause. L'intensité des ondes est liée au secteur MLT et à la distance à la plasmopause : plus l'orbite de CLUSTER est proche de la plasmopause, plus le satellite observe d'ondes et plus elles sont intenses, ceci est valable partout sauf dans le secteur minuit. Enfin, concernant la question des aurores diffuses, nous observons un taux d'émissions intenses plus élevé que dans les études précédentes, toutefois pas suffisant pour pouvoir expliquer les aurores diffuses.

VI.3 Etude statistique des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$

Après avoir détaillé l'étude statistique concernant les émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$, nous allons nous intéresser à l'autre forme d'échange d'énergie dans la région équatoriale, les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$. Nous utilisons toujours les données du satellite C3 sur tous les passages au périégée entre 2002 et 2004. Comme nous l'avons vu plus haut, les ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ sont observées dans 58% des passages au périégée, associées ou non aux émissions équatoriales. Nous allons maintenant chercher à voir si celles-ci sont associées à des émissions mono-harmoniques, et ce, pour les différents secteurs MLT. Les résultats sont représentés sur la Figure 6.11 : ces émissions sont majoritairement associées à la non observation d'émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$, ou alors à l'observation d'une seule harmonique, sauf dans le secteur aube. Toutefois comparativement aux émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$, et comme nous l'avons vérifié dans le Chapitre 5, celles-ci sont beaucoup moins intenses. Bien que nommées $n(1.1)f_{ce}$, ces émissions sont observées généralement avec une seule harmonique, même si nous en avons observé jusqu'à 5 pour quelques événements (événement du 15 août 2002).

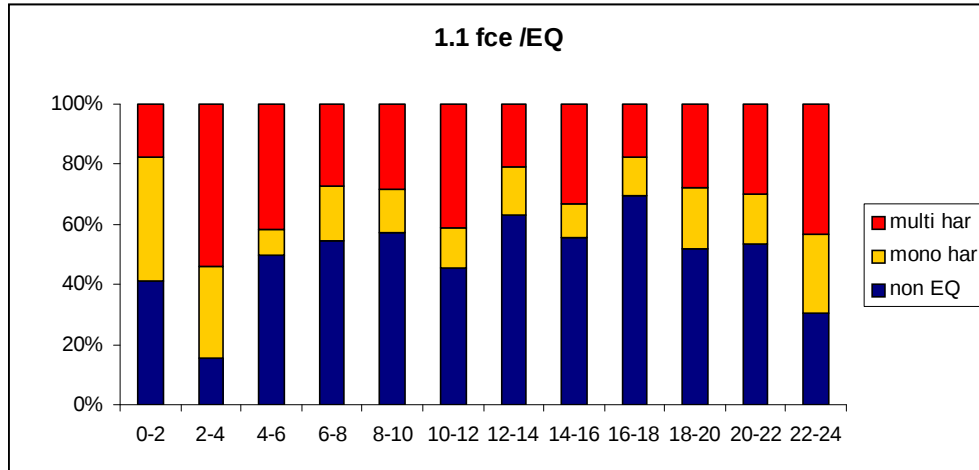


Figure 6.11: Occurrence des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ selon le type d'émissions auxquelles elles sont associées pour les différents secteurs MLT ; le code couleur indique le type d'émissions observées (multi-harmonique, labellisé multi har, mono-harmonique, labellisé mono har et passages au périgée sans observation, labélisée non EQ).

Nous allons maintenant détailler les répartitions selon les secteurs MLT et leur dépendance à la latitude magnétique. L'influence de la valeur de la fréquence plasma sera aussi mise en évidence. Afin de traiter tous les passages au périgée de notre base de données, une méthode de détection automatique basée sur la maximisation de l'énergie, et inspirée des méthodes de détection de la gyrofréquence électronique et de ces harmoniques est utilisée. Le traitement se fait sur une durée de ± 30 minutes autour du périgée. Un intervalle de fréquence défini par $[1.05f_{ce}, 1.2f_{ce}]$ est pris, les valeurs de f_{ce} étant déterminées à l'aide des mesures du champ magnétique données par FGM. Nous recherchons dans cet intervalle les couples (origine, pente) qui définissent une ligne (et aussi ses harmoniques) sur laquelle l'énergie intégrée sur l'intervalle ± 1 minute est maximale. Le point qui maximise l'énergie est gardé. Une fois toutes les valeurs trouvées, on sélectionne celles qui forment une ligne continue. Afin d'éviter les pics dus à de mauvaises détections, la courbe est lissée et on ne garde que les points pour lesquels la valeur absolue de la différence (courbe originale - courbe lissée) est petite.

Les résultats obtenus pour chaque événement sont répertoriés, un fichier par événement est créé où nous notons les temps et fréquence des ondes détectées autour de $1.1 f_{ce}$ pour chaque instant du spectre. Ces fichiers sont traités au final afin d'étudier l'extension en latitude magnétique de ces observations. De façon générale, nous

pouvons dire que les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ sont communément observées sur près de 57 % des passages au périgée, et s'étalent généralement sur les deux hémisphères.

Pour ce traitement, nous nous sommes intéressés seulement à la première bande autour de $1.1 f_{ce}$.

Pour toutes les observations répertoriées, nous avons étudié la moyenne du rapport entre la fréquence observée et la gyrofréquence électronique f_{ce} . Ce rapport est de 1.11 avec un écart type de 0.04.

Nous allons maintenant regarder plus en détail la dépendance de ces observations par rapport au secteur MLT et à l'extension en latitude magnétique.

VI.3.1 Dépendance en MLT

Comme nous l'avons fait précédemment pour les émissions équatoriales, nous allons maintenant regarder les occurrences des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ dans le plan R-MLT (système de coordonnées SM).

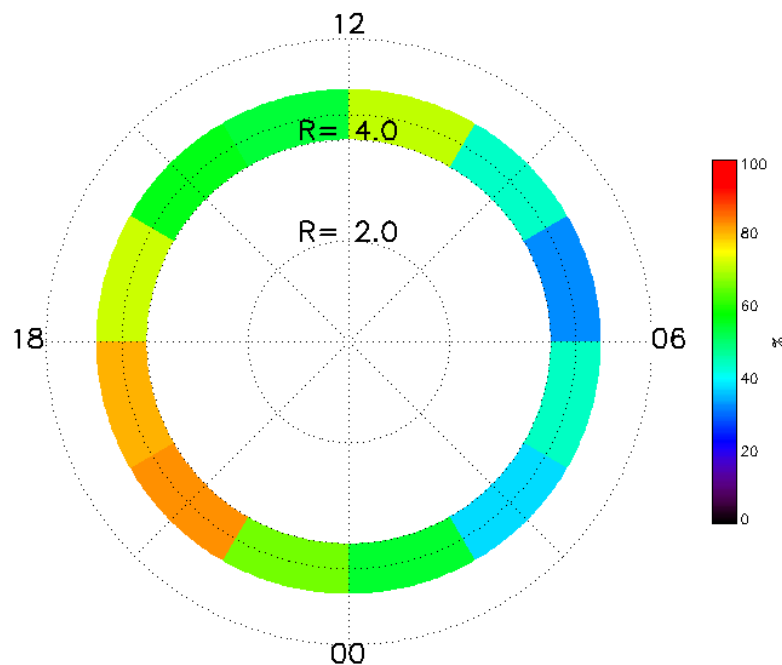


Figure 6.12: Occurrence des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ dans le plan R-MLT.

Sur la Figure 6.12, 12 cellules de dimension $1 R_t \times 2$ heures MLT sont représentées en coordonnées polaires avec en code couleur le nombre de passages dans chaque cellule avec observation d'émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ normalisé au nombre total de passages dans la cellule. Toutes les cellules se situent autour de $4 R_t$. Nous constatons que les occurrences sont significatives dans tous les secteurs MLT, avec une plus grande probabilité (80%) d'observations dans le secteur « bulge » 18-22 MLT et une plus faible probabilité dans le secteur aube.

Comme précédemment, cette asymétrie fait penser à une corrélation entre l'occurrence des ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ et la distance entre le satellite et la plasmopause. Plus le satellite est à l'intérieur de la plasmopause, plus l'occurrence de ces événements aux $n(1.1)f_{ce}$ est élevée. Le proxy f_{p-eq} est utilisé pour évaluer cette distance à la plasmopause. Les valeurs de f_{p-eq} pour tous les passages au périgée sont représentées Figure 6.13, le triangle mauve représente les occurrences des événements aux $n(1.1)f_{ce}$ dans chaque secteur MLT. Comme on l'a vu précédemment, le proxy $f_{p-eq} < 60$ kHz indique si l'observation se fait à l'intérieur ou à l'extérieur de la plasmopause.

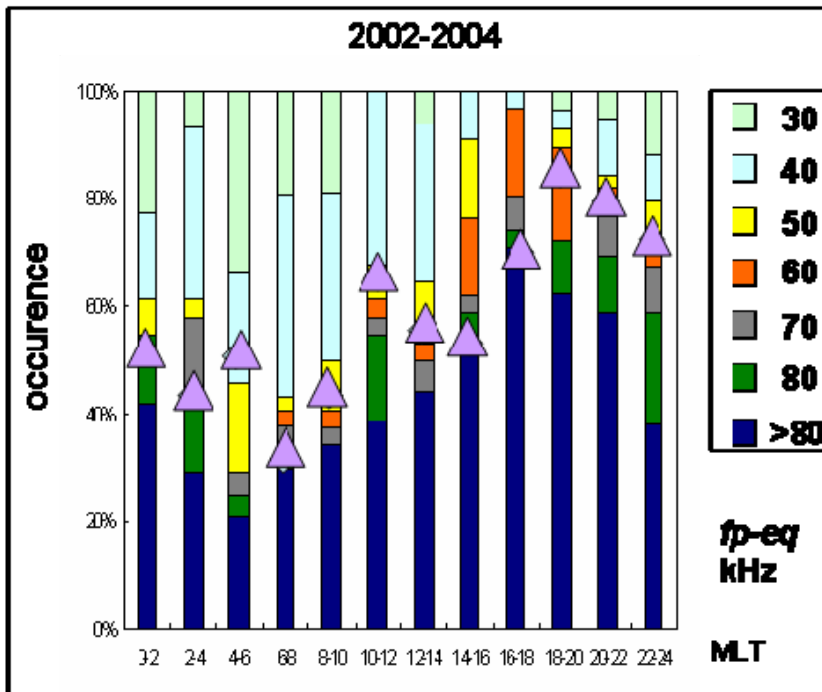


Figure 6.13: Valeurs de la fréquence plasma équatoriale selon les différents secteurs MLT, le triangle mauve représente les occurrences des observations aux $n(1.1)f_{ce}$.

Toutes les observations d'émissions aux $n(1.1)f_{ce}$, sont à des valeurs de $f_{p-eq} > 60$ kHz, dans quasiment tous les secteurs MLT, excepté le secteur aube. L'occurrence la plus élevée se trouve dans le secteur crépuscule pour des valeurs élevées de fréquence plasma équatoriale, ce qui indique que ces observations se font à l'intérieur de la plasmopause, là où l'écrantage des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ est le plus efficace. L'énergie entre particules s'échange donc sous cette nouvelle forme d'ondes (voir schéma de la Figure 6.8.).

VI.3.2 Dépendance en latitude magnétique

Afin d'étudier la dépendance en latitude magnétique des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$, le résultat du traitement automatique va être analysé et ce, pour la première bande harmonique autour de $n(1.1)f_{ce}$. Nous allons noter pour chaque événement les temps de début et fin d'observation, ainsi que leurs latitudes correspondantes (dans le système de coordonnées SM).

Nous pouvons classer nos événements en 3 catégories différentes :

- Événements observés uniquement dans l'hémisphère sud : 7%
- Événements observés uniquement dans l'hémisphère nord : 9%
- Événements qui s'étendent dans les deux hémisphères : 84% du total.

Nous avons également étudié l'extension en latitude magnétique de ces observations : celles-ci s'étendent de -10° à $+11^\circ$ en moyenne avec des valeurs les plus probables de -15° à $+15^\circ$. Ces variations de l'extension en latitude magnétique sont représentées sur la Figure 6.14.

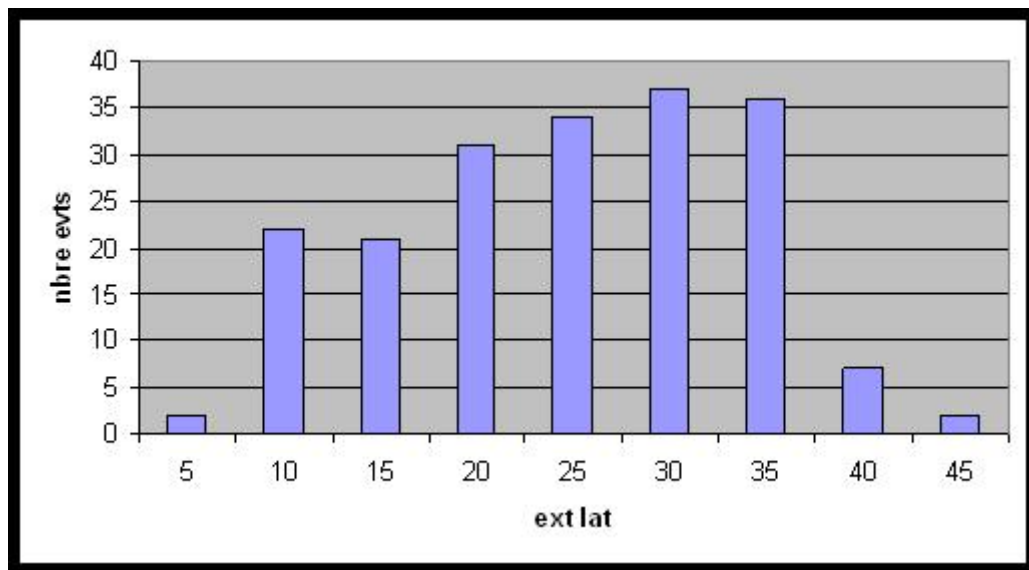


Figure 6.14: Histogramme représentant l'étendue en latitude magnétique (différence entre latitude de début et latitude de fin) des émissions aux $n(1.1)f_{ce}$.

La moyenne de l'extension en latitude magnétique est de l'ordre de 20° . La largeur de bande de ces émissions (est inférieure à 1 kHz) et reste constante sur toute la durée de l'observation. L'intensité de ces émissions reste plus faible que l'intensité des émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$, mais nous n'avons pas étudié systématiquement ces valeurs. Il en ressort donc que les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ sont le plus souvent observées dans le secteur crépuscule pour des valeurs élevées de fréquence plasma équatoriale, et qu'elles s'étendent jusqu'à des latitudes élevées, comportement à l'opposé de celui des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

VI.4 Etude statistique sur les émissions aux nf_{ce}

Dans cette partie, nous allons présenter une étude statistique sur les émissions aux nf_{ce} . Nous avons vu que ces émissions sont rares et ne sont observées que dans 8% des passages au périgée durant les années 2002 à 2004, soit seulement 30 passages au périgée. Il est toutefois possible de faire ressortir des propriétés communes à ces observations quand aux positions en MLT. Ces émissions se situent exactement aux harmoniques de f_{ce} et sont supérieures à la fréquence plasma (voir dans le Chapitre 5

l'étude de l'événement du 17 mars 2003). Elles sont observées sous une forme bien particulière de plasmasphère dite « en arbre de Noël ».

Nous avons choisi de traiter les données du satellite C3, mais de toujours vérifier que le satellite C4 observe les mêmes émissions, ce dernier étant le moins affecté par les autres instruments à bord, en particulier l'instrument EDI.

VI.4.1 Dépendance en MLT

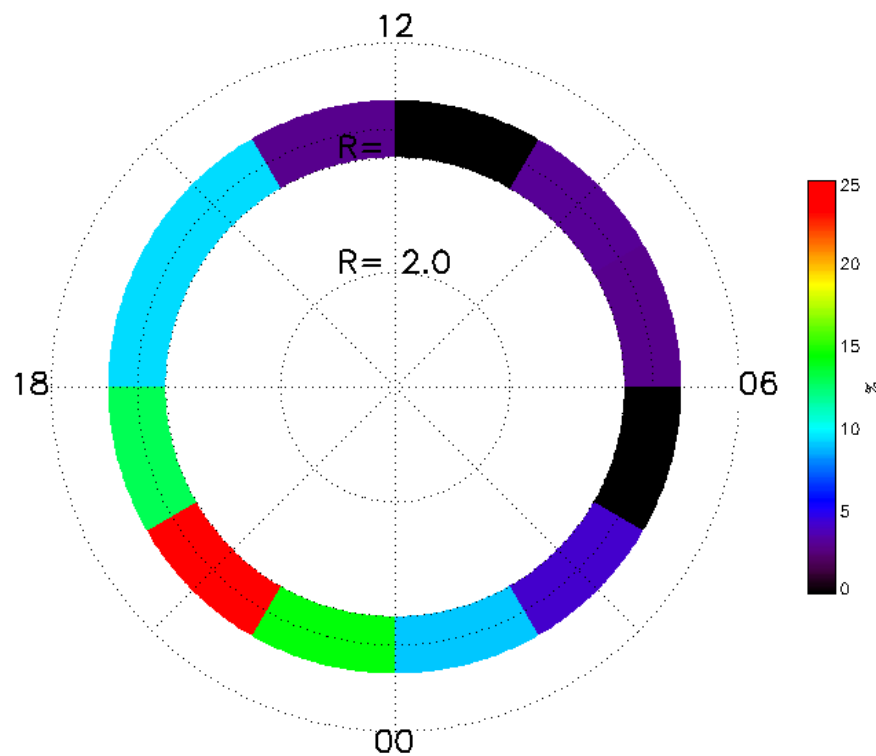


Figure 6.15: Occurrence des observations aux nf_{ce} représentation selon le même modèle que la Figure 6.13

La Figure 6.15 présente l'occurrence des observations d'ondes aux nf_{ce} en coordonnées polaires, dans le plan R-MLT en système de coordonnées SM. Comme précédemment, 12 cellules de $1R_i \times 2h$ MLT sont représentées, avec comme code couleur le nombre de passage avec observation d'émissions aux nf_{ce} normalisé au total de passages dans chaque cellule.

Ces émissions sont observées avec un maximum de 25% du total des passages au périgée dans le secteur 20-02 MLT avec une moyenne d'occurrence de 20% dans le secteur avant-minuit. De plus, l'extension de notre étude statistique sur trois années supplémentaires (2005-2007) permet de voir que ces ondes sont toujours observées dans ce secteur MLT (avant-minuit). Nous remarquons toutefois une diminution du nombre d'évènements aux nf_{ce} pour les passages au périgée de l'année 2007 du fait du changement de l'orbite de CLUSTER, la forme de plasmasphère en « arbre de Noël » étant moins souvent observée. Il apparaît clairement que ces émissions ne sont observées que dans un secteur MLT donné, pour une forme de plasmasphère bien particulière.

VI.4.2 Valeurs de la fréquence plasma équatoriale

Après avoir observé que l'apparition des ondes aux nf_{ce} se fait pour une forme de plasmasphère bien particulière, nous allons voir maintenant les valeurs de la fréquence plasma équatoriale pour ces émissions. La Figure 6.16 nous donne les valeurs typiques de fréquence équatoriale pour l'observation des ondes aux nf_{ce} : elles sont inférieures à 50 kHz dans plus de 90% des passages. Ces valeurs sont typiques de la forme de plasmasphère dite en « arbre de Noël ».

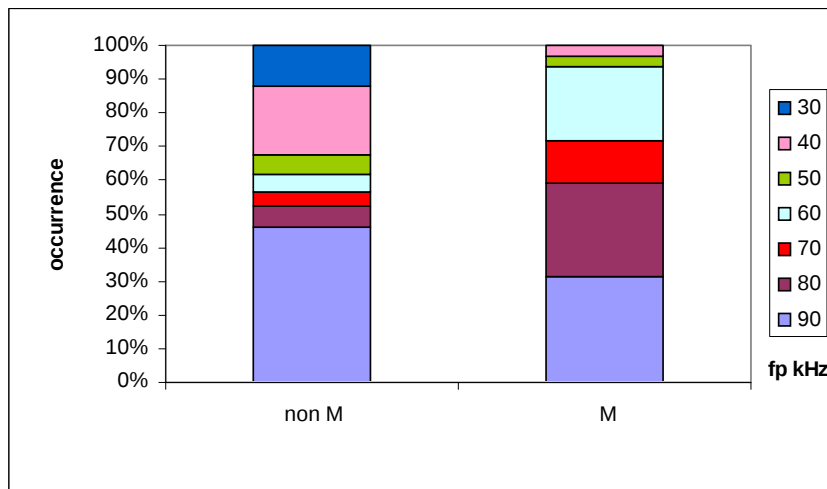


Figure 6.16: Valeurs de fréquence plasma équatoriale pour observations d'ondes aux nf_{ce} labélisées M, le label non M indique les passages sans observation d'ondes aux nf_{ce} .

Il ressort donc de cette étude statistique que les événements aux nf_{ce} sont localisés dans un secteur MLT bien particulier et que l'observation de ces émissions reste assez rare.

VI.5 Influence de l'activité géomagnétique

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de l'activité géomagnétique sur l'observation des différents types d'ondes dans la plasmasphère. Pour cela, nous analysons les 387 passages au périgée du satellite C3 sur la durée 2002-2004 et nous étudions les variations des indices Kp, Dst et AE sur les 24 heures précédant chaque passage au périgée. Comme on l'a vu dans le Chapitre 1, ces indices sont de bons indicateurs d'activité géomagnétique dans la plasmasphère, région de la magnétosphère interne. Nous allons chercher à voir si des conditions géophysiques différentes prévalent lors de l'apparition de ces différents types d'ondes.

Nous avons divisé tous nos passages en cinq groupes selon le type d'ondes observées; les observations aux nf_{ce} feront l'objet d'une discrimination à part, et l'autre différenciation se fera par rapport à l'observation ou non d'ondes électrostatiques, aux $(n+1/2)f_{ce}$ et aux $n(1.1)f_{ce}$.

Cela nous donne les cinq groupes suivants

Différenciation par rapport à l'observation des nf_{ce}

- passages avec observations d'ondes aux nf_{ce} labélisé M : 30 passages.

Différenciation par rapport à l'observation des émissions électrostatiques, les ondes aux nf_{ce} peuvent y être indifféremment observées ou pas

- passages avec observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ associées aux ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ labélisés EQ H : 114 passages.
- passages avec observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ non associées aux ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ labellisés EQ NH : 150 passages.
- passages sans observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ avec observation d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ labellisés NEQ H : 113 passages.
- passages sans observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et sans observation d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ labellisés NEQ NH : 10 passages.

Nous allons donc regarder l'évolution des différents indices d'activité géomagnétique pour tous ces groupes afin de voir si l'activité géomagnétique joue un rôle sur le type d'émissions observées.

VI.5.1 Variations de l'indice Kp

Dans cette partie, nous allons étudier les variations de l'indice Kp sur les 24 heures précédant chaque passage au périhélie, et ce pour les 5 groupes d'événements présentés plus haut. Nous représentons également l'activité géomagnétique moyenne sur les 3 années d'étude (2002-2004) pour tous les passages au périhélie à titre indicatif.

Les variations de l'indice Kp sont divisées en trois groupes :

$Kp < 2^+$: activité géomagnétique faible ;

$2^+ \leq Kp < 5^+$: activité géomagnétique modérée ;

$Kp \geq 5^+$: activité géomagnétique élevée.

Le nombre relatif d'événements dans chaque groupe est représenté par la longueur des barres couleurs sur la Figure 6.17. L'activité géomagnétique moyenne sur tous les passages au périhélie est modérée avec moins de 5% des passages avec une activité géomagnétique élevée ($Kp \geq 5^+$), moins de 40% des passages avec une activité modérée ($2^+ \leq Kp < 5^+$) et plus de 50% des passages avec une activité faible ($Kp < 2^+$).

Nous notons pour les passages avec observation d'ondes aux nf_{ce} , une activité géomagnétique plus élevée que la moyenne avec une augmentation de l'indice Kp dans les trois heures précédant le passage au périhélie. En effet, les pourcentages de Kp dans la gamme $2^+ \leq Kp < 5^+$ passent de 34% à 50%. Le faible pourcentage de Kp élevé confirme la forme non aplatie en « arbre de Noël » corrélée à ces observations.

D'un autre côté, pour les catégories d'observations discriminées par rapport à l'observation d'ondes électrostatiques, nous remarquons que les variations de Kp pour la catégorie NEQ NH sont assez aléatoires et ne montrent pas de tendance « continue » sur les 24 heures précédant les passages. Néanmoins, vu le faible nombre de passages, les conclusions que l'on peut tirer sur cette catégorie ne sont pas significatives.

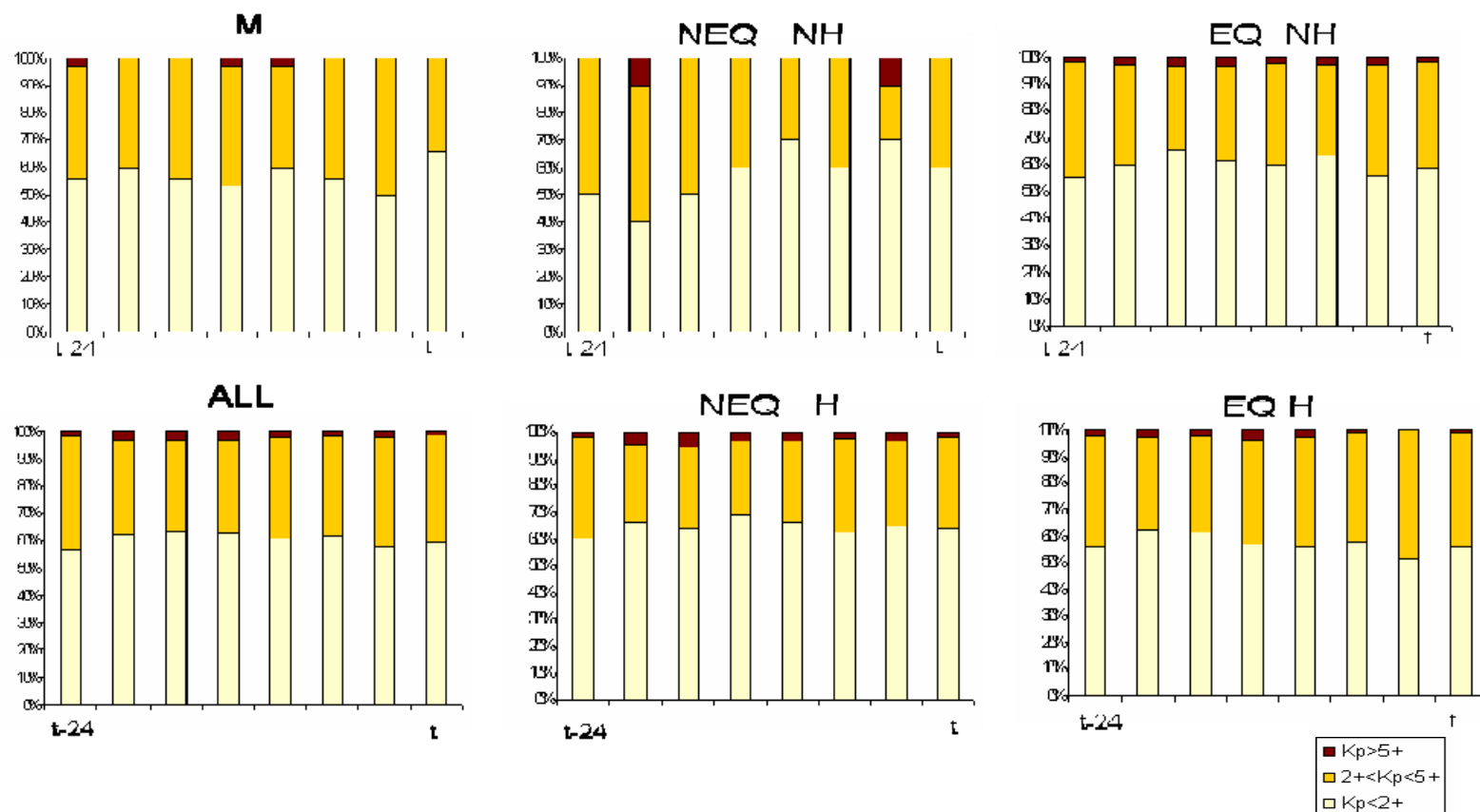


Figure 6.17: Variations de l'indice Kp sur les 24 heures précédant un passage, représentée pour les 5 catégories d'observation, ainsi que pour tous les passages au périhélie, les variations de l'indice Kp ont été divisées en trois gammes données par les différents code couleur. Le label M indique l'observations des ondes aux $n f_{ce}$, EQH indique les passages avec observations simultanées d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$, NEQNH indique les passages sans observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et sans observation d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$, NEQH indique les passages avec observation d'onde aux $n(1.1)f_{ce}$ et sans observation d'onde aux $(n+1/2)f_{ce}$ EQNH indique les passages avec observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et sans observation d'onde aux $n(1.1)f_{ce}$.

Si l'on compare les passages avec et sans observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, on peut voir que les observations d'ondes EQ se font pour une activité géomagnétique plus élevée que les passages sans observation d'ondes EQ, avec en moyenne 20% de plus pour la catégorie Kp modéré (autour de 50% trois heures avant les passages EQH contre 25% pour les passages NEQ H).

Nous avons aussi cherché à séparer les variations de l'indice Kp pour les émissions équatoriales intenses et pour les émissions équatoriales peu intenses (seuil des $3.10^{-3} V_{rms}.Hz^{-1/2}$). Il n'apparaît pas de différences marquées entre les conditions géophysiques qui prévalent pour les émissions intenses et celles pour les émissions peu intenses.

Il n'apparaît pas de grosses différences dans les variations de l'indice Kp pour les différentes catégories d'observation. On peut seulement remarquer que les émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$ apparaissent pour une activité géomagnétique modérée, comparativement aux observations aux $n(1.1)f_{ce}$ qui apparaissent pour une activité géomagnétique faible.

VI.5.2 Variations de l'indice Dst

Après avoir étudié les variations de l'indice Kp, nous allons maintenant étudier les variations de l'indice Dst, sur les 24 heures précédant un événement et toujours pour les cinq catégories d'observations différentes. Nous allons aussi représenter l'activité géomagnétique moyenne sur la totalité des passages au périgée de notre base de données à titre indicatif.

Les variations de l'indice Dst sont divisées en quatre groupes :

Dst > 0 nT : activité géomagnétique très faible ;

-30 nT < Dst < 0 nT: activité géomagnétique faible ;

-60 nT < Dst < -30 nT activité géomagnétique modérée ;

Dst < -60 nT activité géomagnétique élevée.

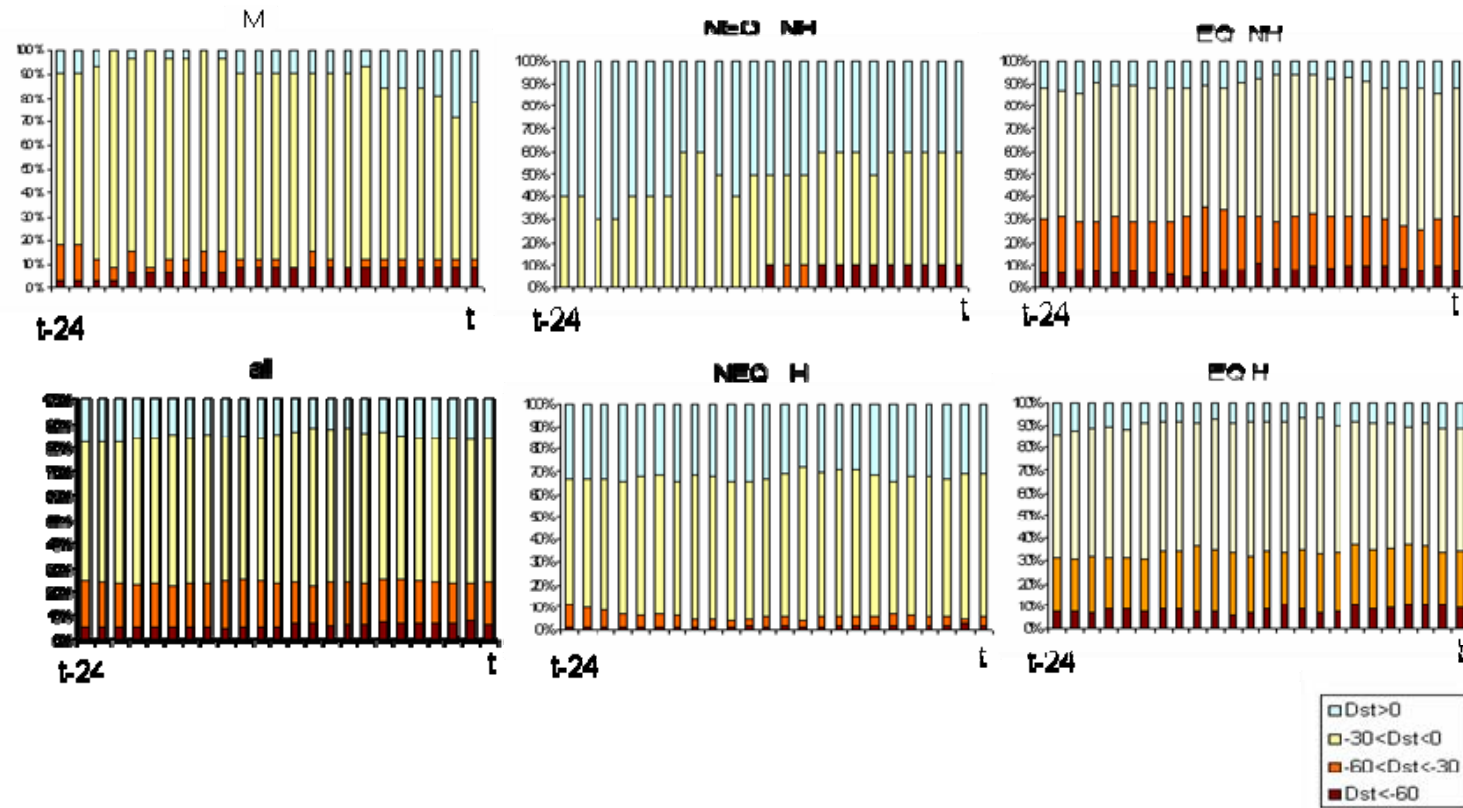


Figure 6.18: Variations de l'indice Dst sur les 24 heures précédant un passage, représentée pour les 5 catégories d'observations, ainsi que pour tous les passages au périgée, les variations de l'indice Dst ont été divisées en quatre gammes données par les différents codes couleur. M indique l'observation des ondes aux $n f_{ce}$, EQH indique les passages avec observation simultanées d'ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$ et d'ondes aux $n(1.1) f_{ce}$, NEQNH indique les passages sans observation d'ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$ et sans observation d'ondes aux $n(1.1) f_{ce}$; NEQH indique les passages avec observation d'ondes aux $n(1.1) f_{ce}$ et sans observation d'onde aux $(n+1/2) f_{ce}$ EQNH indique les passages avec observations d'ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$ et sans observation d'onde aux $n(1.1) f_{ce}$.

Le nombre relatif d'événements dans chaque classe est représenté par la longueur des barres couleurs sur la Figure 6.18. Les variations de l'indice Dst pour les passages au périgée des trois années étudiées nous indiquent que l'activité géomagnétique est modérée avec plus de 70% des passages dans la gamme $Dst > 0$ et $-30 < Dst$. Comme on l'a fait pour l'indice Kp, nous allons différencier les cinq catégories d'observations selon les variations correspondantes de leur indice Dst.

Pour les passages avec observations aux nf_{ce} , l'activité géomagnétique est faible sur les 24 heures précédant les observations avec plus de 80% de passages avec un Dst positif ou faible. Cela montre qu'il n'y a pas d'augmentation de l'intensité du courant annulaire, ni d'activité particulière dans la région interne de la magnétosphère.

D'un autre côté, pour les passages avec observation d'ondes électrostatiques, on peut voir que pour les passages sans observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et sans observation d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$, un Dst positif est noté dans plus de 50% des passages durant les 24 heures précédant les passages. Nous observons aussi un Dst faible dans près de 40% des passages. Un passage de plasmasphère présente néanmoins un Dst élevé, mais n'est pas significatif sur étude statistique.

Pour les passages sans observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et avec observation d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ 90% des passages présentent un Dst positif ou faible sur les 24 heures précédant ce passages. Cette proportion de Dst positif ou faible est supérieure à celle observée dans la tendance générale.

Pour les passages avec observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ associées ou non aux émissions aux $n(1.1)f_{ce}$, nous constatons une augmentation de la proportion des Dst modérés ou élevés avec près de 30% des événements et ce, sur les 24 heures précédant les passages au périgée.

Nous pouvons donc dire que les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ apparaissent pour une activité géomagnétique « modérée », sans variation particulière sur les 24 heures précédant les passages au périgée alors que les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ apparaissent pour une activité géomagnétique faible. Pour les émissions aux nf_{ce} , il n'y a pas de différenciation claire par rapport à la tendance générale.

Les variations de l'indice Dst pour sur les 24 heures précédant les passages avec observations d'onde $(n+1/2)f_{ce}$ équatoriale intense et peu intense n'ont pas montré de différence significative.

VI.5.3 Variations de l'indice AE

Nous allons maintenant voir l'influence de l'activité géomagnétique sur les différents types d'observations d'ondes et ce à travers les variations de l'indice AE sur les 24 heures précédant un passage au périgée. Cette étude est réalisée pour les 5 groupes d'événements que nous avons présentés, les résultats obtenus pour tous les passages au périgée sont aussi représentés à titre indicatif.

Les valeurs de l'indice AE sont divisées en quatre groupes :

$AE < 100$ nT: activité géomagnétique faible ;

$100 \text{ nT} < AE < 300$ nT: activité géomagnétique modérée ;

$300 \text{ nT} < AE < 700$ nT: activité géomagnétique élevée ;

$700 \text{ nT} < AE$: activité géomagnétique forte.

L'activité géomagnétique est modérée durant les 3 années de données étudiées avec plus de 40% de passages avec $100 \text{ nT} < AE < 300$ nT et autour de 20% de passages avec $300 \text{ nT} < AE < 700$ nT, moins de 5% des passages ont un $AE > 700$ nT.

Nous allons séparer les différents types d'observation selon les variations de l'indice AE. Pour les passages avec observation d'ondes aux $n f_{ce}$ (M) une variation aléatoire avec une augmentation de la proportion des AE élevés ou bien forts, (près de 60% des passages) est notée entre les 23 heures et 24 heures précédant l'observation, ce qui peut indiquer une injection dans les régions aurorales. Néanmoins il est nécessaire d'étendre l'étude statistique sur ces observations afin d'avoir un nombre d'événements plus conséquent.

Pour les passages sans observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et sans observations d'ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ (NEQ NH), la majorité des passages (près de 80%) se fait avec un $AE < 300$ nT, ce qui montre qu'un « minimum » d'activité géomagnétique est nécessaire pour l'apparition de ces ondes électrostatiques. Pour la catégorie NEQNH, l'activité géomagnétique est faible avec près de 30% des passages avec $AE < 100$ nT et 30% de passages avec $100 \text{ nT} < AE < 300$ nT, alors que l'activité géomagnétique est modérée à élevée pour l'observation des ondes équatoriales, avec une proportion de AE modérés autour de 50% pour celles associées aux ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ (EQ H) et autour de 40% pour celles non associées aux ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ (catégorie EQ NH). La proportion des AE élevés pour ces deux catégories passe de 30% pour la catégorie EQH à 40% pour la catégorie EQ NH.

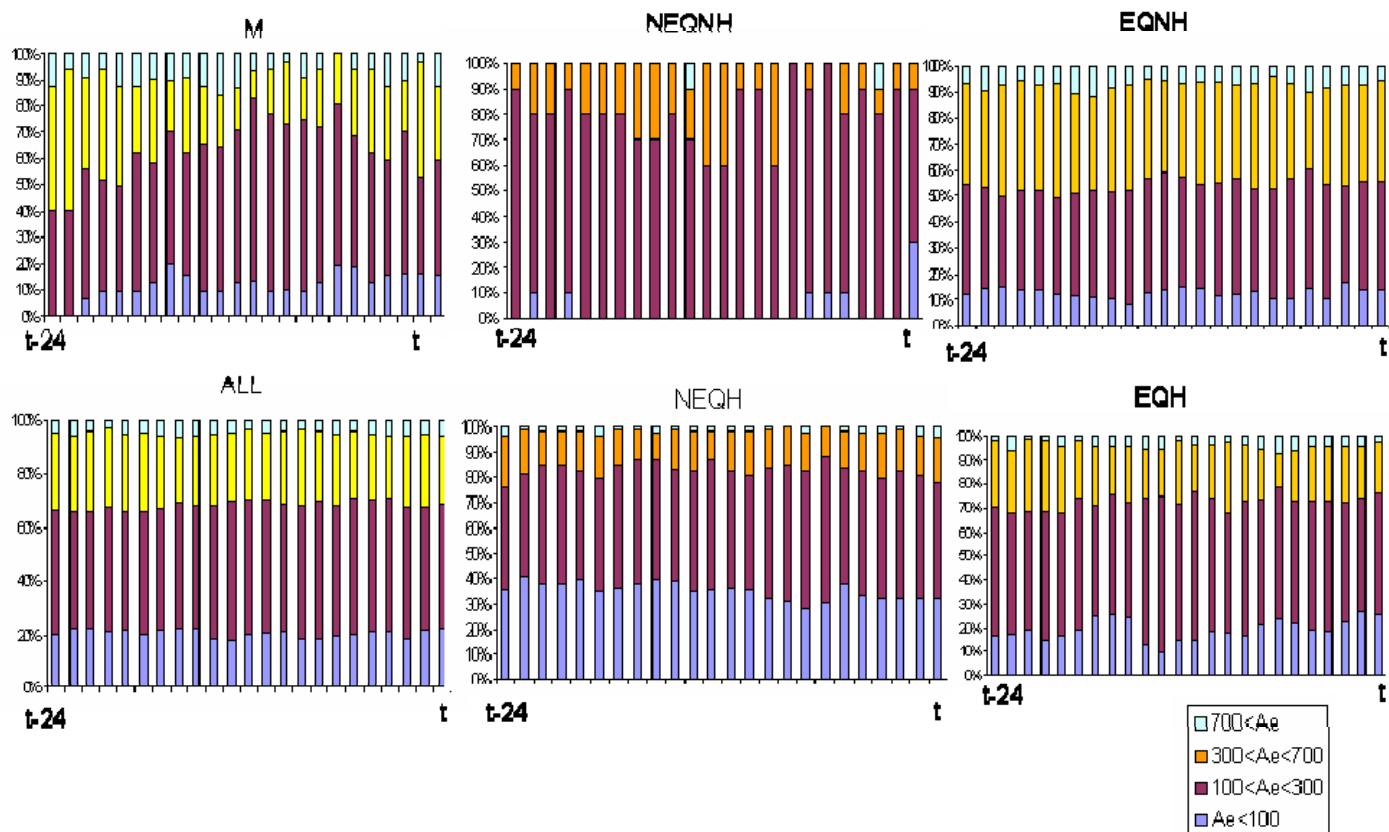


Figure 6.19: Variations de l'indice AE sur les 24 heures précédant un passage, représentée pour les 5 catégories d'observation, ainsi que pour tous les passages au périgée, les variations de l'indice AE ont été divisées en quatre gamme données par les différents code couleur.

M indique l'observations des ondes aux $n f_{ce}$, *EQH* indique les passage avec observation simultanées d'ondes aux $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$ et d'ondes aux $n(1.1) f_{ce}$, *NEQNH* indique les passages sans observations d'ondes aux $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$ et sans observation d'ondes aux $n(1.1) f_{ce}$; *NEQH* indique les passages avec observation d'onde aux $n(1.1) f_{ce}$ et sans observation d'onde aux $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$ *EQNH* indique les passages avec observation d'ondes aux $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$ et sans observation d'onde aux $n(1.1) f_{ce}$.

Nous avons aussi cherché à différencier les variations de l'indice AE pour l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ intenses ou pas. Il en ressort que la proportion des AE élevés pour les émissions intenses est plus importante que pour les émissions non intenses passant de 40% en moyenne à près de 20%.

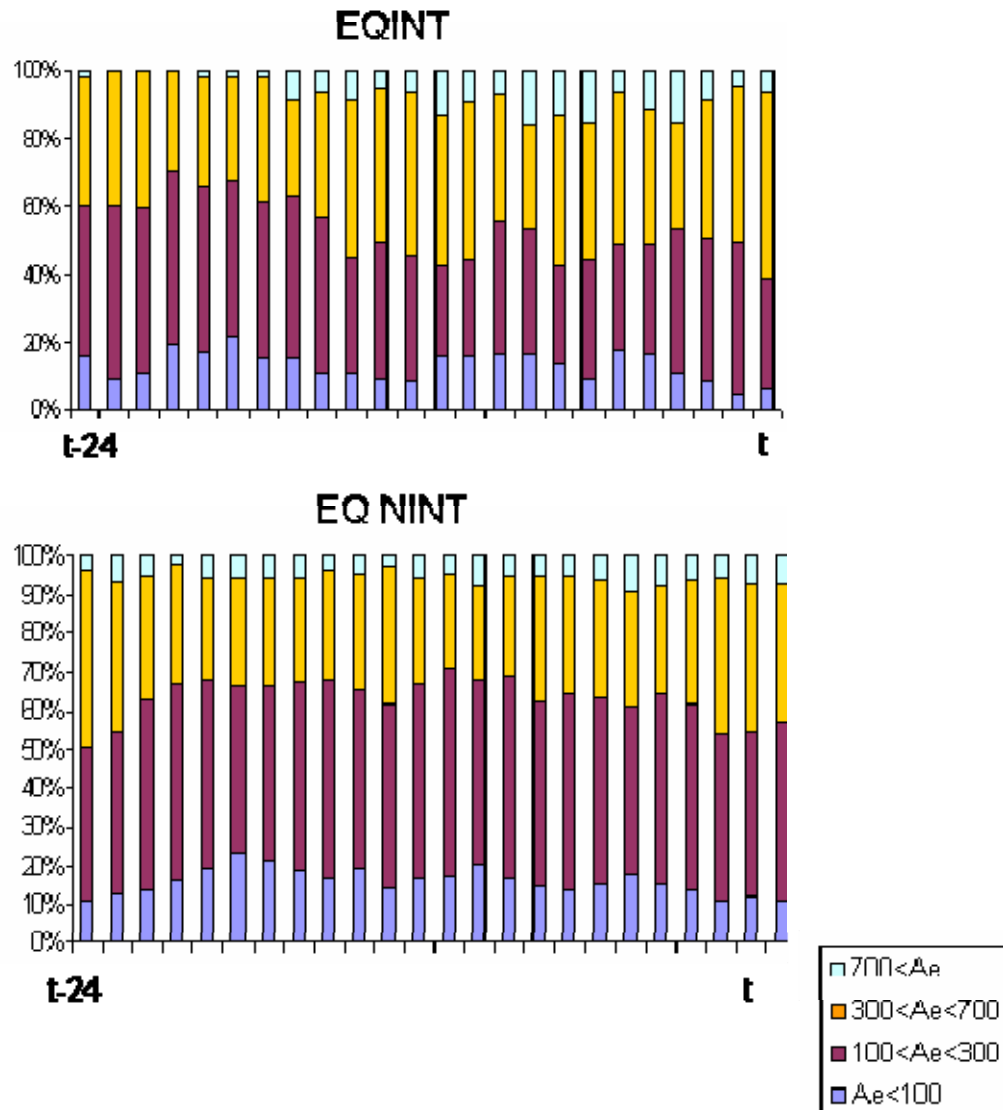


Figure 6.20: Variations de l'indice AE pour l'observation des émissions équatoriales différenciées selon leurs intensités.

Il en ressort donc que les observations aux $(n+1/2)f_{ce}$ se font pour des valeurs élevées à modérées de l'indice AE, alors que l'observation des ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ se fait pour des valeurs faibles à modérées de l'indice AE.

A travers l'étude de l'évolution de ces différents indices d'activité géomagnétique, nous avons cherché à différencier les différents types d'émission selon les conditions géomagnétiques qui prévalent lors de leur observation : il n'est pas ressorti de corrélation claire avec l'indice Kp. Toutefois, une plasmasphère peu aplatie et peu étendue est nécessaire pour l'observation pour les émissions à nf_{ce} , ce que les variations de l'indice Kp ont confirmé. De plus il est apparu une augmentation de l'indice AE entre la 23^{ème} et la 24^{ème} heure précédant l'observation des émissions aux nf_{ce} . L'extension de l'étude statistique sur des années supplémentaires permettra de confirmer ces tendances.

Pour les émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$, l'étude de la variation de l'indice Dst a montré qu'une activité géomagnétique « minimum » dans la région de la magnétosphère interne est nécessaire pour l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$. De plus à travers l'étude des variations de l'indice AE, nous pouvons dire que les injections de particules jouent un rôle primordial dans l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et sur l'intensité de celles-ci.

VI .6 Conclusion

Cette étude statistique sur trois années de données a permis de faire ressortir des caractéristiques générales sur les trois types d'émissions auxquelles nous nous sommes intéressés, nous résumerons ces caractéristiques dans le Tableau 6.3.

Nous pouvons voir que les différents types d'ondes qui peuvent être observés dans la plasmasphère ne diffèrent pas seulement par leurs caractéristiques spectrales, mais aussi par leur localisation en MLT. Des conditions géophysiques différentes lors de leurs observations ont été constatées. De part l'orbite de CLUSTER, il a été possible de traverser clairement et sans ambiguïté l'équateur magnétique, et de couvrir tous les secteurs MLT sur une année de données.

	Occurrence	Secteur MLT	f_{peq}	Activité géomagnétique
$(n+1/2)f_{ce}$	68%	Tous / Plus Aube	<60	modérée
$n(1.1)f_{ce}$	58%	Tous / Plus Crépuscule	>60	Faible
nf_{ce}	8%	Avant minuit	60-80	Injection particules

Tableau 6.3 résumé des propriétés des différents types d'observations : occurrence normalisée par rapport au total des passages (387), secteur d'observation, valeurs de fréquence plasma équatoriale et activité géomagnétique.

Notre base de données sur trois ans nous a permis de séparer les effets d'orbite des effets géomagnétiques pour l'observation ou non d'un type d'onde donné.

Les ondes les plus couramment observées sont les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ avec plus de 68% du total d'observations, celles-ci pouvant être associées ou non aux ondes aux $n(1.1)f_{ce}$. Les ondes aux nf_{ce} sont le moins souvent observées.

La distance à la plasmopause, définie dans notre travail par la valeur de la fréquence plasma équatoriale, va déterminer le type d'émissions observées.

Les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont localisées dans tous les secteurs MLT à condition que $f_{p-eq} < 60$ kHz soit vérifiée, une plus grande occurrence est observée côté aube, ce qui confirme les observations précédentes. La condition $f_{p-eq} < 60$ kHz traduit le fait que l'orbite de CLUSTER est proche de la plasmopause, ce qui confirme le rôle des inhomogénéités du milieu dans l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$. De plus l'injection des particules énergétiques provenant de la queue se fait côté minuit, avec un mouvement de dérive vers le secteur aube. Ces particules énergétiques vont jouer sur la distribution des particules, rendant celle ci instable et favorisant la déstabilisation plus importante de ces ondes dans le secteur aube.

L'étude statistique portant sur l'intensité de ces ondes montre que celles-ci ne sont pas assez intenses pour expliquer le phénomène des aurores diffuses, dans le cadre de la théorie linéaire. Enfin, ces ondes sont observées pour une activité géomagnétique

modérée, identique à celle prévalant lors de l'observation des aurores diffuses. Concernant les ondes autour de $n(1.1)f_{ce}$, celles-ci sont aussi observées dans tous les secteurs MLT pour peu que la condition $f_{p-eq} > 60$ kHz soit vérifiée, ces ondes sont donc observées lorsque l'orbite de CLUSTER est à l'intérieur de la plasmasphère. Elles semblent donc refléter une autre forme de transfert d'énergie entre les particules, lorsque les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ ne sont pas observées.

Enfin, concernant les émissions aux nf_{ce} qui n'ont jamais été observées auparavant, une forte localisation en MLT, dans le secteur avant minuit, a été mise en évidence, avec une observation lors de traversée de plasmasphère en forme dite « d'arbre de Noël ». L'étude de la variation de l'indice AE a montré une augmentation de la proportion des AE élevés à la 23 ème et 24 ème heure précédant l'observation des ondes aux nf_{ce} , ce qui semble indiquer une corrélation entre l'injection de particules dans la région aurorale et l'observation des ondes autour de nf_{ce} .

L'extension de notre statistique sur les années 2005-2007 permettra de confirmer ces propriétés et d'étendre la statistique sur une plus grande gamme de distances radiales.

Données particules dans la région équatoriale

Nous allons nous intéresser dans ce qui suit aux signatures électroniques dans la région équatoriale de la plasmasphère. Deux aspects sont à étudier :

- Quelle est la forme de la fonction de distribution observée, celle-ci peut-elle déstabiliser le plasma et exciter les ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$?
- Les flux de particules sont-ils modifiés lorsqu'on observe des ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$?

VII.1 Données particules dans la région équatoriale :

Corrélation avec les observations d'ondes aux $(n + \frac{1}{2})f_{ce}$

Nous allons étudier dans cette partie les signatures des données électrons dans la région équatoriale de la plasmasphère, mesurées par l'instrument PEACE.

Les détecteurs de cet instrument mesurent les flux d'électrons dans différentes gammes d'énergie (voir Chapitre 3 § III 3. 3). Le nombre de passages au péricée avec l'instrument PEACE en fonctionnement est très faible, puisque il a été choisi de préserver les détecteurs des particules énergétiques présentes. Néanmoins, des opérations « spéciales » CLUSTER ont permis d'avoir quelques passages au péricée avec des données de PEACE disponibles.

VII.1.1 Populations électroniques

Lors de la traversée de plasmasphère du 02 juillet 2004 que nous avons déjà étudiée dans le Chapitre 5 (voir Figure 5.8), l'instrument PEACE était en fonctionnement pour les quatre satellites CLUSTER. Nous avons donc pu analyser les signatures électroniques pour cet événement. Sur la Figure 7.1, on peut voir un spectrogramme temps-énergie des flux d'électrons obtenu pour les deux senseurs HSPAD (panneaux supérieurs) et LSPAD (panneaux inférieurs) dans la direction parallèle au champ magnétique.

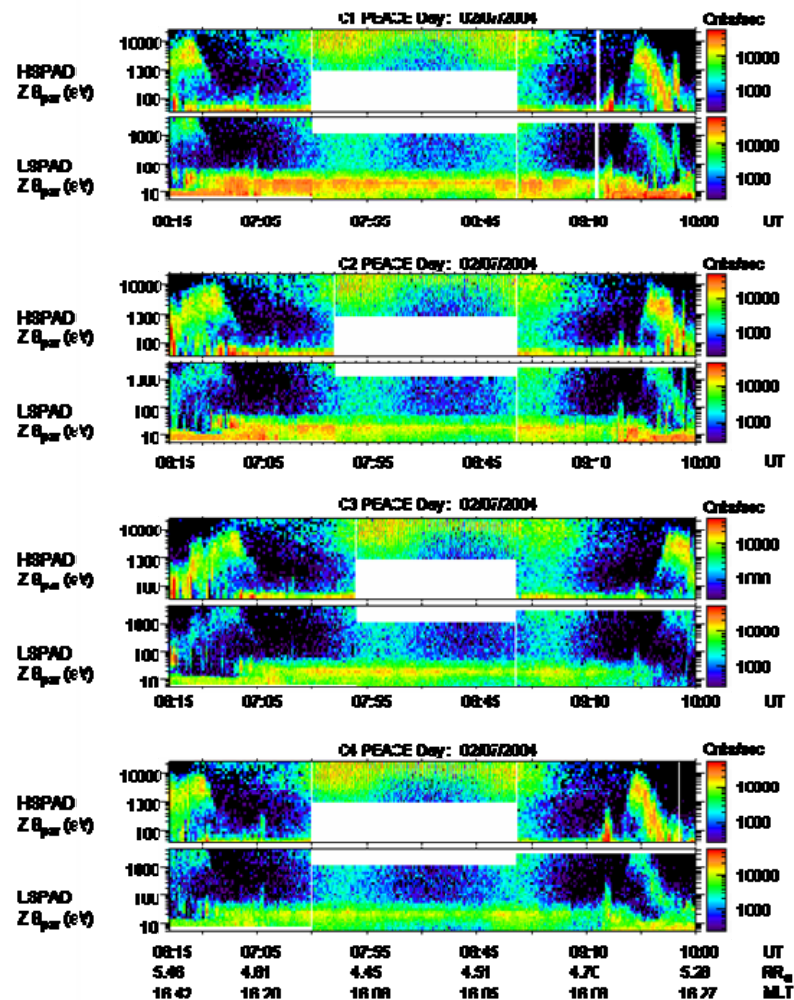


Figure 7.1 : Spectrogrammes temp- énergie du flux des électrons dans la direction parallèle au champ magnétique pour les quatre satellites, pour la traversée de plasmasphère du 02 juillet 2004.

Les flux d'électrons mesurés dans les tranches d'énergie et d'angle solide concernées sont exprimés en taux de comptage (cnts.s^{-1}) dans une représentation en code couleur.

Les deux senseurs vont mesurer des flux dans des gammes d'énergies différentes. Entre 4 eV et 4 keV pour le senseur LSPAD, et entre 40 eV et 20 keV pour le senseur HSPAD. Les deux senseurs sont activés dans un mode de fonctionnement qui permet la meilleure résolution en énergie, durant une période limitée, ce qui supprime la redondance des mesures sur la gamme intermédiaire commune (d'où le pavé blanc central visible sur la Figure 7.1).

Comme les quatre satellites sont en configuration rapprochée, nous pouvons remarquer les mêmes signatures sur les populations électroniques présentes. Nous allons nous focaliser sur les observations du satellite C1. Les spectrogrammes temps énergie sont représentés Figure 7.2 entre 07:30 et 08:30 TU dans 3 directions privilégiées par rapport au champ magnétique: directions parallèle (en bas), anti parallèle (en haut) et perpendiculaire (au centre) au champ magnétique $\mathbf{B}$. Les données des deux senseurs sont représentées entre 4 eV et 1 keV pour le senseur LSPAD (panneaux inférieurs) et entre 1 keV et 20 keV pour le senseur HSPAD (panneaux supérieurs).

Nous pouvons noter la présence d'une population à haute énergie, autour de 20 keV, dans les trois directions par rapport au champ magnétique, comme cela est repéré par la flèche noire des panneaux supérieurs. Ces populations sont dues à la présence du courant annulaire. Elles sont observées tout le long de la traversée de la région équatoriale entre 07:30 et 08:30 TU. Elles ne sont donc pas corrélées avec les observations des émissions aux $(n+\frac{1}{2})f_{ce}$ équatoriales, qui apparaissent seulement entre 07:53 et 08:02 TU. Nous pouvons aussi constater la présence d'une population à plus basse énergie (autour de 20 eV) dans les directions parallèle et anti parallèle à $\mathbf{B}$ (flèches noires sur les panneaux inférieurs), cette population est d'origine ionosphérique.

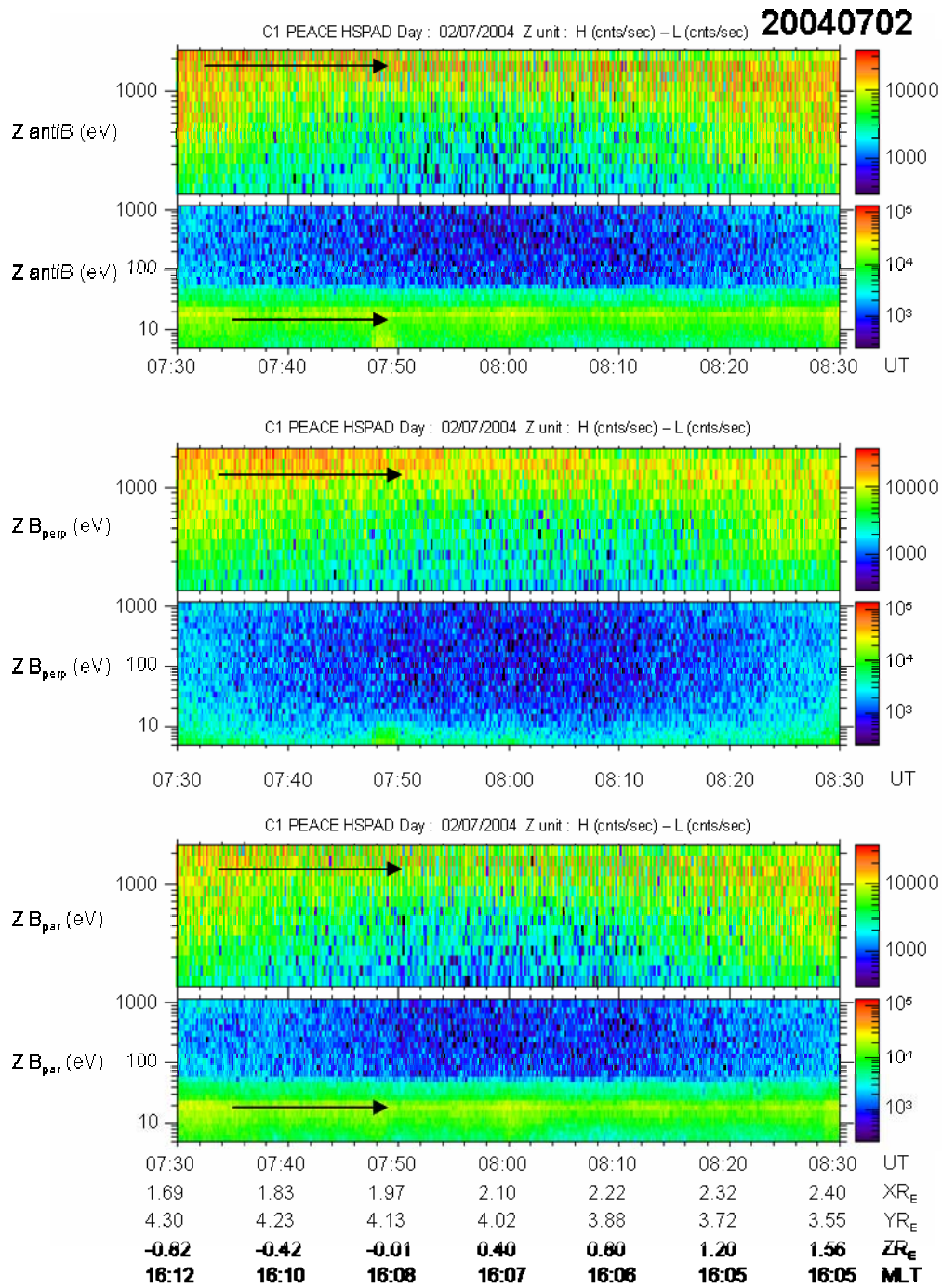


Figure 7.2: Spectrogrammes temps-énergie des flux d'électrons pour le satellite C1 dans les directions, respectivement de haut en bas, anti parallèle, perpendiculaire et parallèle à $\mathbf{B}$.

D'autre part comme on l'a vu dans le Chapitre 5, de nombreux creux de densité sont présents sur les satellites C1 et C4. La Figure 7.3 fournit une vue plus détaillée de la distribution angulaire des électrons de basse énergie, comparée aux variations de densité N_e (déduites de EFW), tracées sur le panneau inférieur, pour le satellite C1. La

quantité tracée en bas est en réalité $-V_s$, où V_s est le potentiel du satellite, donnant une estimation de la densité électronique puisqu'une relation empirique relie les deux quantités : N_e varie comme $(-V_s)$. Nous pouvons voir sur les panneaux supérieurs de la Figure 7.3, que les signatures des populations électroniques sont corrélées aux creux de densité. Ces deux spectrogrammes temps/angle d'attaque représentent, en code couleur, les taux de comptage des flux intégrés sur une gamme d'énergie fixe (~ 4 à 1000 eV en haut et 4 à 10 eV en bas). Nous remarquons, sur les deux spectrogrammes, un flux d'électrons remontants et un flux d'électrons descendants, observés exactement aux mêmes instants que les creux de densités. Ce flux est bien marqué pour la gamme d'énergie la plus basse, ce qui indique un remplissage des creux de densité par des particules d'origine ionosphérique.

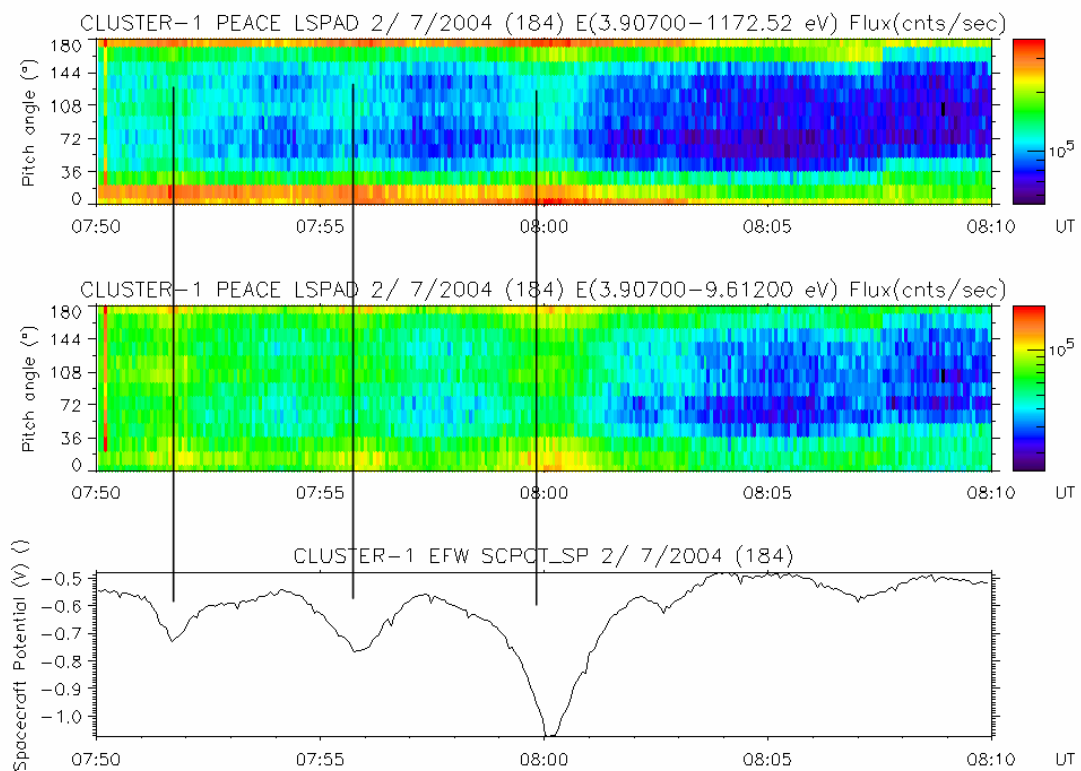


Figure 7.3: Spectrogramme temps /angle d'attaque, flux des électrons dans la gamme 3 eV-1172 eV sur le panneau du haut, flux des électrons à plus basses énergies (3.9-9.6 eV) au milieu, différence de potentiel entre capteurs électriques et satellite en bas.

En résumé, des flux d'électrons de différentes énergies peuvent être observés dans la région équatoriale de la plasmasphère. Tout d'abord, des populations à haute énergie indiquant la présence du courant annulaire, puis des populations à plus basse énergie d'origine ionosphérique qui remplissent les tubes de flux alignés aux creux de densité. Néanmoins, on ne note pas de signature particulière sur les flux de particules à l'instant des observations d'ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$, contrairement à ce qui a été observé pour certains événements par Koons et Fennel (1984). Les flux de particules ne sont donc pas modifiés par l'observation des ondes aux $(n+1/2) f_{ce}$.

VII.1.2 Evolution de la fonction de distribution

Nous allons maintenant étudier plus finement l'évolution de la fonction de distribution des électrons durant l'intervalle d'observation des ondes équatoriales et vérifier si celle-ci présente une signature particulière en corrélation avec les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Comme on peut le voir sur le spectrogramme de WHISPER pour le satellite C1 (Figure 7.4), deux séries d'harmoniques aux $(n+1/2) f_{ce}$ sont observées entre 07:53 et 08:02 TU et entre -2° et 2° de latitude magnétique. La seconde série d'harmonique est liée à la présence d'un creux de densité (voir Figure 5.9). Nous avons représenté, (Figure 7.4) la fonction de distribution électronique en fonction des composantes d'énergie parallèle et perpendiculaire au champ magnétique aux instants représentés par les flèches rouges. Les graduations sur les axes représentent les différentes gammes d'énergie. Le code couleur nous donne les valeurs du flux en taux de comptage par seconde.

Pour une meilleure visualisation, nous avons dupliqué les données en miroir, en supposant ainsi la gyrotropie de la fonction de distribution mesurée.

Un seul demi-espace est exploré en réalité, représenté sur la partie gauche de la figure.

Les trois instants analysés sont :

- 07:53 TU avant l'observation des émissions électrostatiques équatoriales.
- 07:56 TU pendant l'observation de la première série d'harmoniques.
- 07:58 TU pendant l'observation de la seconde série d'harmoniques.

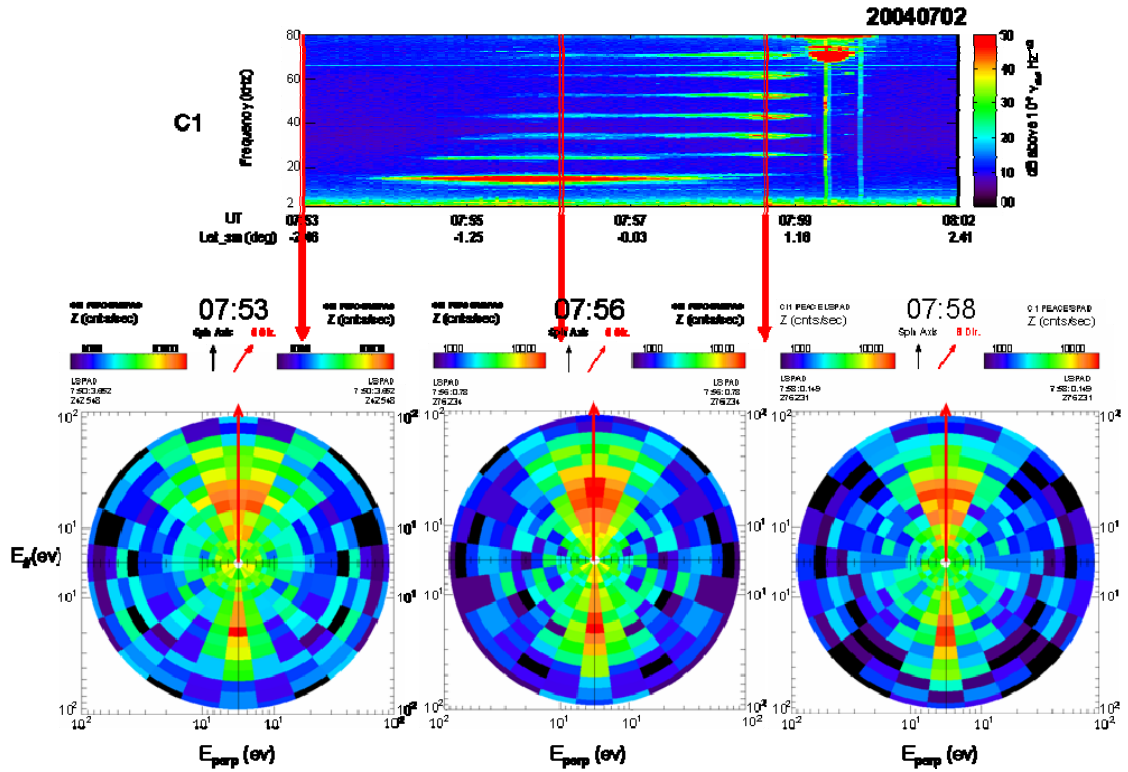


Figure 7.4 : En haut : spectrogramme des données de WHISPER dans la région équatoriale avec l'observation des ondes à $(n+1/2)f_{ce}$. En bas : suivi des fonctions de distribution électroniques à 07:53, 07:56 et 07:58 TU. Le code couleur indique le taux de comptage par seconde, dans une tranche d'angle solide et d'énergie donnée. Les vitesses parallèles à $\mathbf{B}$ (particules venant du Sud) sont placées en haut du cercle.

Nous pouvons noter sur ces représentations que les taux de comptage sont très élevés dans les directions parallèle et anti parallèle à $\mathbf{B}$ et sont très faibles dans la direction perpendiculaire. Nous remarquons également qu'il y a plus de particules autour de l'énergie 20 eV, ce qui signifie la présence d'une bosse dans la queue de la fonction de distribution. Cette forme de la fonction de distribution est favorable à l'apparition d'instabilité et peut être la source d'énergie libre (Rönmark et al., 1978 ; Kurth et al., 1979 ; Sentman et al., 1979). Néanmoins, en comparant ces trois observations, nous ne notons pas de différence majeure entre ces trois instants, avant et pendant les observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$. De même que l'on n'a pas noté d'évolution sur la fonction de distribution au cours des instants postérieurs.

Nous pouvons donc dire, à travers ce suivi chronologique de la fonction de distribution, qu'il n'y a pas de forme particulière de celle-ci pendant l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, mais que la forme en faisceau aligné au champ avec «bosse dans la queue» est présente tout le long de traversée des régions équatoriales, ce qui montre que le plasma est continûment instable dans ces régions, facilitant ainsi la génération des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

VII.1.3 Signatures particulières de la fonction de distribution

Après avoir étudié la fonction de distribution pour une observation donnée d'ondes équatoriales, et ayant montré que la forme de celle-ci n'évoluait pas de manière significative sur un intervalle d'étude englobant l'observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, nous allons maintenant chercher à voir si la signature de la fonction de distribution est corrélée à l'intensité des émissions équatoriales observées.

Comme nous l'avons vu Chapitre 5 et 6 et comme on peut le voir sur les spectrogrammes de la Figure 7.5 pour les traversées de plasmasphère du 22 janvier 2006 et du 05 juillet 2003 respectivement, les observations d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ diffèrent de par leur forme et leur intensité. Les valeurs d'intensité mesurées vont de quelques $10^{-6} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$ à $10^{-2} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$ pour les plus intenses.

Pour l'évènement du 22 janvier 2006, nous pouvons noter l'observation d'émissions intenses près de l'équateur magnétique (traversé vers 15:45 TU). Le niveau d'intensité excède le seuil de saturation pour une grande partie des spectres mesurés au voisinage de l'équateur, ce qui crée des répliques artificielles, comme indiquée par la barre au dessus du spectrogramme. Cependant, le suivi spectre à spectre des données ondes a permis de mettre en évidence la présence d'une émission naturelle autour de $3/2 f_{ce}$ dont l'intensité maximale est de $1.5 \cdot 10^{-3} V_{rms} \cdot Hz^{-1/2}$ (vers 15:44 TU).

Nous avons étudié la forme de la fonction de distribution en énergie et en direction des électrons autour de cet instant. Elle est représentée dans la partie centrale de la Figure 7.5 (à gauche). Le demi-cercle de gauche présente les taux de comptages dans la gamme d'énergies détectées par le capteur HSPAD, le demi-cercle de droite celles détectées par le capteur LSPAD. Notons la présence d'électrons à haute énergie sur cette fonction de distribution avec des flux dirigés majoritairement dans la direction

perpendiculaire au champ magnétique $\mathbf{B}$, ceci sur les deux senseurs. Cette forme de la fonction de distribution est qualifiée de « pancake distribution », (Meredith et al., 2000). On peut aussi noter l'augmentation du flux pour des populations autour de 100 eV, et autour de 1000 eV, ce qui indique la présence de « bosses » dans la queue de la fonction de distribution et donc un plasma instable dans ces régions.

Lors de la traversée de plasmasphère du 5 juillet 2003, nous pouvons noter la présence d'émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ autour de l'équateur magnétique (vers 00:33 TU, spectrogramme en bas de la Figure 7.5). Dans ce cas, quatre harmoniques sont observées avec des formes spectrales particulières bien marquées. L'intensité de la première bande est de l'ordre de $6.10^{-5} V_{rms}.Hz^{-1/2}$. Nous avons aussi représenté la fonction de distribution des électrons en angle d'attaque autour de 00:35 TU (partie centrale de la Figure 7.5, à droite). La présentation est la même que pour le cas précédant : les flux sont représentés pour le détecteur HSPAD à gauche et pour LSPAD à droite. On peut voir que les vitesses sont majoritairement alignées à $\mathbf{B}$. Enfin, nous avons examiné systématiquement la forme de la fonction de distribution lorsque les analyseurs d'électrons ont été activés autour de l'équateur magnétique et ce, pour les événements avec observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$. Il en ressort que les distributions des vitesses sont alignées avec le champ magnétique $\mathbf{B}$ pour les observations d'ondes équatoriales peu intenses, alors qu'elles se présentent sous forme de « pancake » (flux dans la direction perpendiculaire à $\mathbf{B}$) pour les événements très intenses.

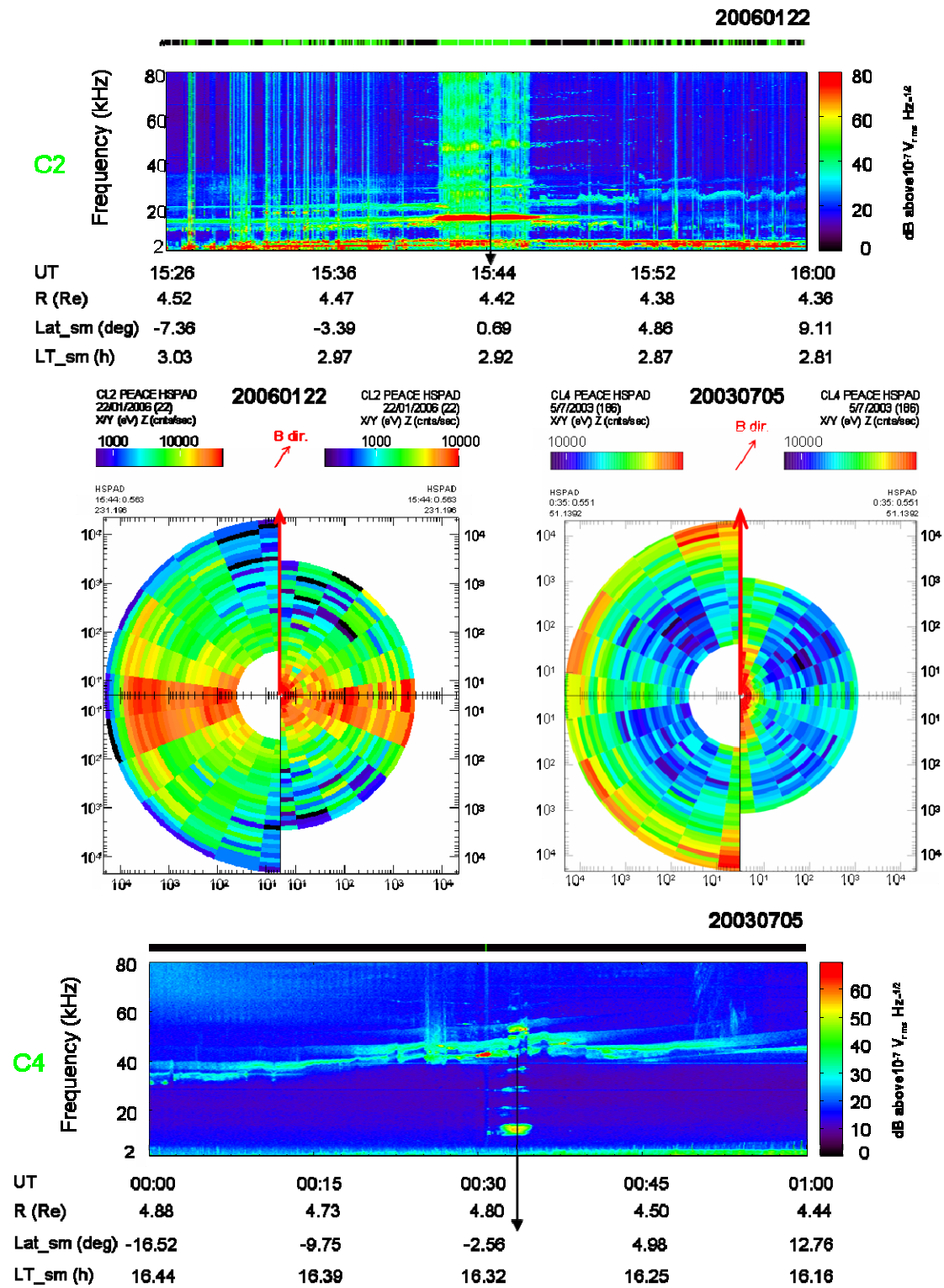


Figure 7.5 : Signatures de fonction de distribution électroniques pour deux observations typiques d'ondes aux $(n + \frac{1}{2})$ fce. Cas du 22 janvier 2006 (en haut et au milieu à gauche), émissions intenses et distribution en « pancake ». Cas du 5 juillet 2003 (en bas et au milieu à droite), émissions d'intensité moyenne et distribution alignée avec le champ magnétique.

En résumé

Le suivi de la fonction de distribution électronique n'a pas montré de corrélation claire avec l'observation des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$, néanmoins une source d'instabilité est présente dans cette région avec une « queue » dans la fonction de distribution. Ces conditions « bump on tail » peuvent expliquer l'apparition d'instabilités (Kennel et Ashour-Abdalla, 1982 ; Rönmark 1978, 1990 ; Koons et Fennel, 1984) mais celles-ci ne sont pas limitées aux intervalles temporels d'observation des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Nous avons pu mettre en évidence une corrélation entre la forme de la fonction de distribution observée et l'intensité des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées, la fonction de distribution étant en pancake pour les ondes équatoriales intenses et alignée au champ pour les ondes équatoriales peu intenses.

Indépendamment de la présence des $(n+1/2)f_{ce}$ équatoriales, nous avons pu mettre en évidence une corrélation entre un renforcement d'intensité des flux alignés et la présence de creux de densité.

Partie 4

Génération des ondes électrostatiques

Dans cette partie, nous allons rappeler deux méthodes générales utilisées dans la littérature pour étudier la génération des ondes électrostatiques autour des $(n+1/2) f_{ce}$.

Nous présentons notamment une approche par simulation particulière 2-1/2 D visant à reproduire la structure fine des émissions électrostatiques observées aux $(n+1/2) f_{ce}$.

Simulation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$

Plusieurs types d'ondes sont observés dans la région de la plasmasphère par l'instrument WHISPER, ondes aux nf_{ce} , ondes, aux $n(1.1)f_{ce}$ et enfin ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Dans cette partie, nous allons tout d'abord commencer par présenter les méthodes numériques utilisant la théorie linéaire pour retrouver les courbes de dispersion du plasma. Nous présenterons ensuite une approche de résolution utilisant un code particule 2-1/2D afin de reproduire les structures fines des émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées, structures qui sont vraisemblablement liées à des inhomogénéités du milieu.

VIII. 1 Courbes de dispersion obtenues par la théorie linéaire

Comme on l'a vu dans l'Annexe 2, la résolution de l'équation de dispersion écrite dans la théorie linéaire plasma chaud nécessite une approche numérique.

Nous présenterons dans ce qui suit, un des codes de calcul les plus souvent utilisés dans la littérature, le code numérique WHAMP.

VIII.1.1 Code de calcul numérique WHAMP

Comme son nom l'indique, WHAMP (Wave in Homogenous Anisotropic Magnetized Plasma , Rönmark , 1981) résout l'équation de dispersion linéaire électromagnétique dans un plasma homogène anisotrope et magnétisé.

Le plasma est donc supposé comme étant homogène, composé de particules non relativistes.

La fonction de distribution est considérée comme étant une Maxwellienne anisotrope avec la possibilité d'introduire une dérive le long du champ magnétique ambiant. Une fonction de distribution en cône de perte peut être modélisée par l'ajout de plusieurs maxwelliennes avec des températures et des vitesses de dérive différentes. Dans la version originale du code, on peut aller jusqu'à six populations de températures différentes.

La solution de l'équation de dispersion consiste à trouver des solutions de type onde plane $e^{i(\vec{k}\vec{r}-\omega t)}$ de pulsation complexe $\omega = \omega_r + i\omega_i$, où ω_r est la fréquence réelle des ondes et ω_i leur taux de croissance. Elle consiste à identifier les fréquences proches de la fréquence d'initialisation qui est fixée pour qu'il y ait convergence et que les solutions ne soient pas trop amorties.

Cette résolution se fait de manière itérative sur un intervalle de vecteur d'onde $\vec{k}$ défini par sa norme et son angle θ imposé au départ.

Il est ainsi possible de déterminer les modes existant dans un milieu à partir de paramètres d'entrée caractérisant le plasma.

VIII. 1. 2. Courbes de dispersion et taux de croissance pour les émissions électrostatiques autour des $(n+1/2)f_{ce}$

Les ondes électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont, comme leur nom l'indique, observées entre deux gyrofréquences électroniques successives. Différents travaux ont reproduit ces ondes par la simulation numérique. En modélisant la fonction de distribution observée par une somme de Maxwelliennes (Eq. 2.1), il est possible de reproduire une fonction de distribution en cône de perte. Nous allons rappeler brièvement dans ce qui suit les travaux de Horne et al., (2003) se basant sur les données de la missions CREES pour retrouver les premières et seconde harmoniques des émissions observées aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Comme on peut le voir dans la figure 8.1, un mode est observé pour des valeurs normalisées du vecteur d'onde $k\rho$ entre 0.1 et 3, pour chacune des deux bandes (Figure

8.1a et b). Les taux de croissance sont reproduits sur le bas de la figure pour différents angles de propagation, on peut voir que ce taux de croissance est très sensible à l'angle de propagation et qu'il atteint une valeur maximale pour une fréquence autour de $1.9 f_{ce}$ et un angle de propagation quasi perpendiculaire (89.5°)

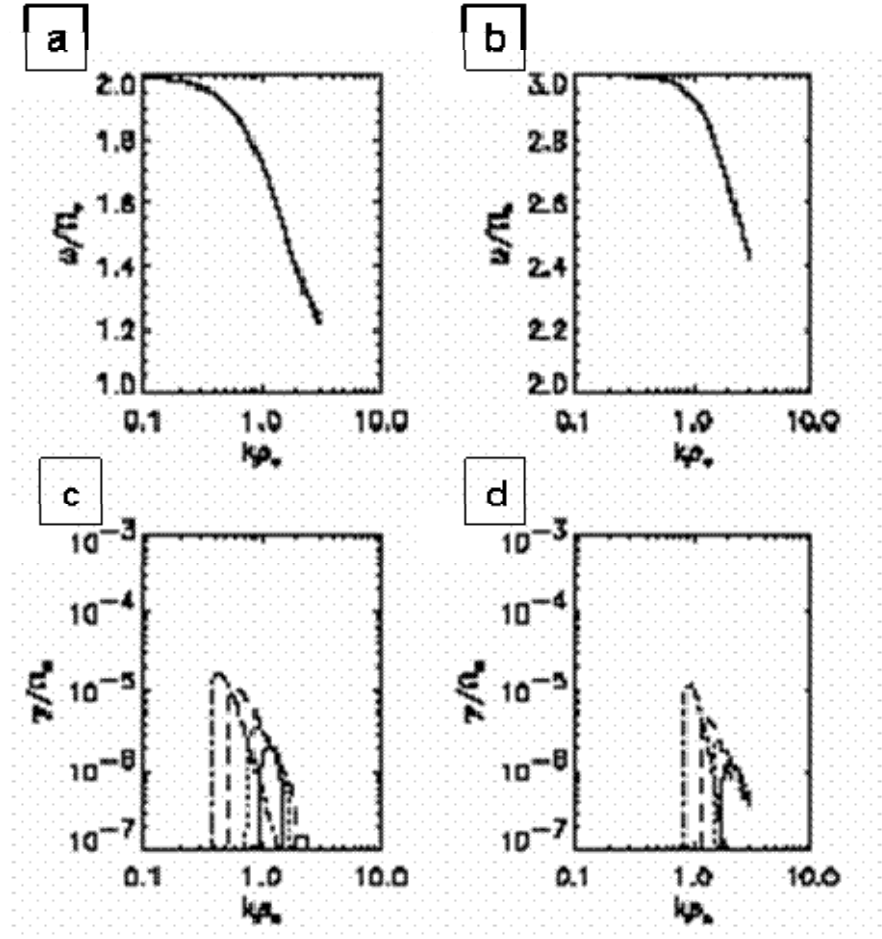


Figure 8.1: Résultats des calculs d'instabilités, d'après Horne et al. (2003). En haut fréquences normalisées en fonction du vecteur d'onde normalisé $k\rho$: ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ pour a) $1 < f/f_{ce} < 2$, b) $2 < f/f_{ce} < 3$; panneaux du bas taux de croissance normalisés correspondant représentés pour différents angles de propagation quasi perpendiculaire ($88^\circ, 88.5^\circ, 89^\circ, 89.5^\circ$) sur le panneau c et ($89^\circ, 89.25^\circ, 89.5^\circ, 89.75^\circ$) sur le panneau d.

Il serait aussi possible d'entreprendre une démarche similaire en utilisant les données de l'instrument PEACE. Toutefois ces travaux ne retrouvent qu'une seule bande entre deux gyrofréquences électroniques successives, la structure fine des

émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ n'étant pas reproduite. Nous utiliserons donc un code particulier pour reproduire cette structure fine.

VIII. 2 Utilisation d'un code particule

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 5, la structure fine des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ semble être liée à des inhomogénéités du milieu (Barbosa, 1985) et n'a pas été reproduite par la théorie linéaire.

L'utilisation d'un code particule semble bien adaptée à cette problématique, puisqu'il serait possible d'intégrer des inhomogénéités dans la boîte de simulation.

Le code que nous avons à notre disposition est un code « particulaire » PIC (Particle In Cells) 2-1/2 D, dans lequel le plasma est décrit comme un ensemble de particules chargées de taille finie interagissant de façon auto-consistante avec les champs. Ce code est basé sur une description intuitive du plasma puisque il est réellement composé de particules chargées de taille finie interagissant de façon auto-consistante avec les champs.

Dans ces codes de simulation, le terme particule ne désigne pas de particule à proprement parlé mais une entité « virtuelle » modélisant les effets de charge. On peut avoir des particules de charge positive et des particules de charge négative. Il existe plusieurs sortes de codes particules, à une, deux ou trois dimensions spatiales.

Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux codes électrostatiques (Dawson, 1962) ; plus précisément au modèle 2-1/2 D qui a été utilisé dans des travaux précédents pour reproduire les modes de Bernstein f_{qn} (Kamimura, 1978).

VIII. 2. 1. Modèle électrostatique 2-1/2 D

Le modèle électrostatique 2-1/2 D consiste en une boîte de simulation avec un grand nombre de particules chargées. Celles avec une charge négative (les électrons) sont autorisées à se déplacer dans les directions spatiales x et y et ont trois composantes de vitesses. Les ions eux sont immobiles. Le champ magnétique statique peut avoir une direction quelconque dans le plan y-z (ou en dehors) (Figure 8.2)

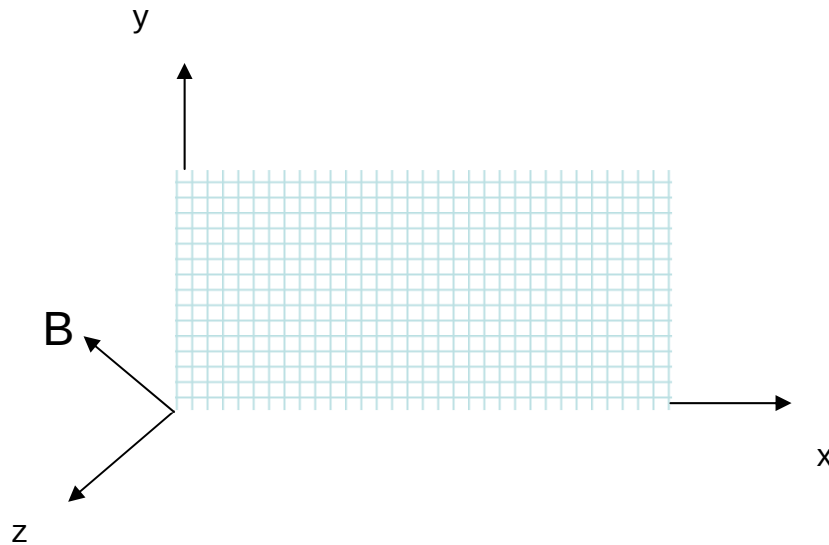


Figure 8.2 : Schéma simplifié résumant le code particule.

Le système est considéré comme étant périodique en x et y , c'est-à-dire que les particules qui sortent par un côté sont réintroduites dans le côté opposé. Le modèle est dit 2-1/2 D parce que l'on a 5 dimensions dans l'espace des phases :

Deux dimensions dans l'espace réel xy

Trois dimensions dans l'espace des vitesses v_x, v_y, v_z , et ce quelle que soit l'orientation du champ magnétique $\mathbf{B}$.

L'évolution des particules dans le temps est suivie par un schéma aux différences leap-frog ou « saut de grenouille » (Dawson, 1983), c'est à dire que le passage d'une itération temporelle à une autre (séparée de δt) se fait en s'aidant de quantités intermédiaires calculées aux demi pas de temps $\delta t/2$ de l'intervalle.

Dans ces itérations, la taille des particules est finie. (Voir annexe 3 sur le code particule).

Pour négliger les effets de collisions entre particules, la notion de facteur de forme est introduite, ce qui permet aux particules de s'approcher entre elles jusqu'à la distance de Debye λ_D .

Les ions sont considérés immobiles comme un fond neutralisant les charges électroniques. Cette hypothèse est tout à fait valable à haute fréquence (domaine qui nous intéresse) puisque $f \gg f_{ce}$.

La fonction de distribution des vitesses initiales des électrons est choisie comme une Maxwellienne. Les particules sont distribuées de façon aléatoire (dans l'espace des vitesses), mais sont distribuées de manière uniforme dans l'espace réel.

Afin d'éviter le bruit thermique relié à la grille, l'espace entre deux points grille a été choisi supérieur ou égal à la longueur de Debye.

Afin d'identifier les modes propres dispersifs (ω, k) du plasma, à partir de simulation particulière PIC, une fonction d'autocorrélation est appliquée sur les fluctuations spatio-temporelles des composantes du champ électrostatique $ELX(x,y)$ et $ELY(x,y)$. Nous calculerons aussi les densités de puissance spectrale de ces modes, pour chaque composante de Fourier. Les définitions des fonctions d'auto corrélation sont données en Annexe 3.

VIII. 2. 2. Simulation test en propagation perpendiculaire

Avant d'appliquer le code électrostatique pour des distributions instables qui vont exciter les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, nous allons d'abord faire un test par un run dit thermique afin d'obtenir les modes propres du système et de déterminer le niveau de bruit atteint.

Nous allons rappeler les résultats de Kamimura (1978) concernant les courbes de dispersion en propagation perpendiculaire obtenus en utilisant un code 2-1/2 D.

Le champ est magnétostatique et le déplacement spatial se fait perpendiculairement au champ magnétique $\mathbf{B}$. L'équation de Poisson va donner les deux composantes $ELX(x,y)$ et $ELY(x,y)$ du champ électrostatique. Ces composantes vont servir pour le calcul des fonctions d'auto corrélation. Lorsque $\mathbf{B}$ est choisi selon l'axe Z, dans ce cas les particules ont un mouvement dans le plan xy.

Lors de ce run thermique, 125*125 particules sont suivies sur une grille de dimension spatiale 32*32 point grilles ; la valeur du rapport f_p/f_{ce} est égal à 5. Pour chaque composante de Fourier en k_{perp} , nous calculons les fonctions d'auto-corrélation et les densités de puissance spectrales (voir Annexe3 pour les définitions des fonctions d'auto-corrélation). Plusieurs pics sont observés sur les densités spectrales d'énergie. Chaque pic correspondant à une harmonique de la fréquence cyclotron.

Nous rappelons Figure 8.3 les courbes de dispersion en propagation perpendiculaire, déterminées par la théorie linéaire (WHAMP), ainsi que les modes de Fourier en k , résultant de la simulation numérique obtenus par Kamimura (1978) représentés par les points noirs.

Nous avons aussi représenté sur cette figure quelques points (triangles rouges) résultant de notre propre simulation numérique.

On peut noter que les résultats du run « test » se situent exactement sur les courbes de dispersion des modes de Bernstein. La résonance hybride haute f_{uh} est égale à $5.06 f_{ce}$.

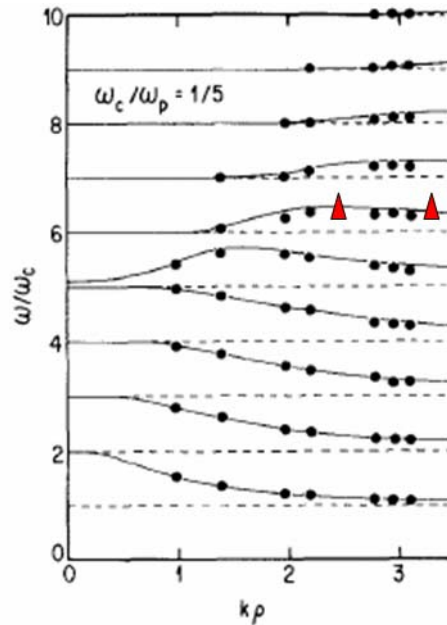


Figure 8.3: Courbes de dispersion en direction perpendiculaire pour la valeur $f_p/f_{ce} = 5$. Les points discrets sont donnés par la simulation particule, les courbes linéaires résultent de la théorie linéaire. (d'après Kamimura, 1978), le résultat de nos propres simulations est représenté par les triangles rouges.

Avec ce « run thermique », nous avons donc pu nous familiariser avec le code électrostatique utilisé et retrouver ainsi les résultats de la théorie linéaire en propagation perpendiculaire.

VIII. 2. 3. Modes observés

Après avoir effectué ce run « test », nous cherchons maintenant à étudier les modes propres du plasma pour deux composantes de Fourier bien définies.

Pour cette simulation, nous nous plaçons toujours dans les mêmes conditions que Kamimura, 1978.

La dimension de la boîte est de 64×64 points grilles avec 192×192 particules.

La valeur du rapport f_p/f_{ce} est choisie comme étant égale à 5. La durée de l'itération est de 10^4 s avec un pas de 0.1s.

Nous résumons dans le Tableau 8.1 les paramètres d'entrée utilisés pour le calcul numérique. Typiquement, la durée de chaque Run est de 6 mn avec une machine sous le système d'exploitation Windows Xp et un processeur de 1.66 GHz.

Taille de la grille	64*64
Nbe de particules	192*192
Intervalle temporel (s)	0-10000
Pas en temps (s)	0.1
ω_p / ω_c ,	5

Tableau 8. 1: Résumé des paramètres d'entrée pour le code.

Durant la simulation, les fluctuations du champ électrique sont stockées sur tous les pas de temps de la simulation. En utilisant ces valeurs, les fonctions d'auto-corrélation et les densités spectrales d'énergie sont calculées pour chaque mode de Fourier k (voir Annexe 3 pour les définitions des fonctions d'auto-corrélation).

Nous rappelons qu'un mode de Fourier (n, m) est donné par

$$k_x = n(2\pi / L_x)$$

$$k_y = m(2\pi / L_y)$$

Avant de passer au calcul des fonctions d'auto corrélation et des densités de puissance spectrale, il est nécessaire d'étudier la variation du champ électrostatique ELX sur tous les pas de temps. Nous définissons un intervalle $[t_0, t_1]$ dans lequel ELX

est stable afin éliminer les valeurs initiales qui peuvent perturber les fonctions d'auto-corrélation.

Comme on peut le voir sur la Figure 8.4, l'énergie du champ électrostatique observé présente des fluctuations importantes sur les 180 premiers pas de temps pendant la phase de croissance.

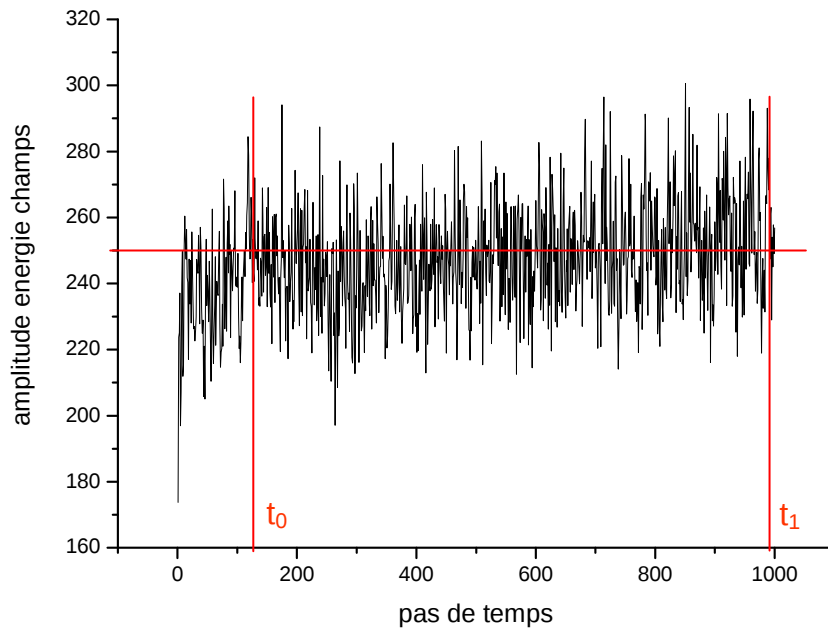


Figure 8.4: *Fluctuations temporelles de l'énergie du champ électrostatique ELX, les temps t_0 et t_1 entre lesquels celui-ci est stable sont représentés par les 2 traits rouges.*

Au-delà de ces premiers pas de temps l'énergie des champs oscille autour d'une valeur normalisée quasi constante de 250.

Nous calculons donc les fonctions d'auto-corrélation et les densités de puissance spectrales sur l'intervalle $[t_0, t_1]$.

Nous allons étudier les densités de puissance spectrale pour les grandes et les petites longueurs d'ondes.

Le mode (2,1) défini par $k_x = 2(2\pi/L_x)$ et $k_y = (2\pi/L_y)$ correspond à de grandes longueurs d'ondes comparativement au rayon de Larmor (6 fois plus grand), c'est-à-dire $k\rho = 1.1$.

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 8.5, l'amplitude de la densité de puissance spectrale est représentée en unités arbitraires, elle est quasi symétrique par rapport à 0, avec des pics bien définis. Six harmoniques sont observées, avec une amplitude maximale pour la branche correspondant à l'hybride haute $\omega_{uh}/\omega_p = \left[1 + (\omega_c/\omega_p)^2\right]^{1/2}$. On peut aussi noter la présence d'un pic à $\omega=0$, celui là correspond au mode convectif et peut être à l'origine de diffusion de particules (Okuda, 1973).

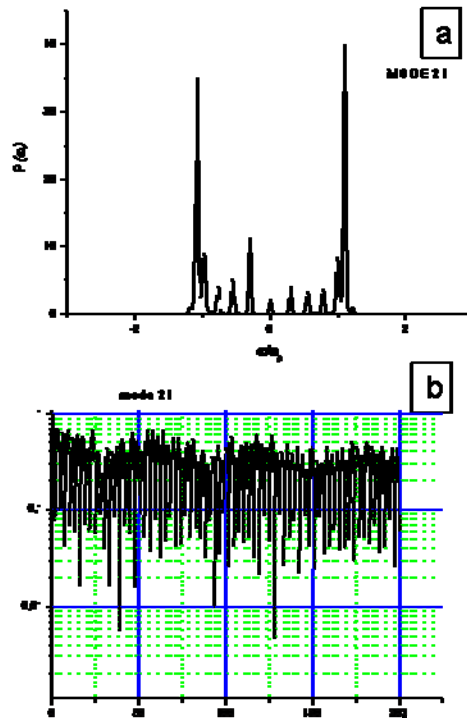


Figure 8.5: Résultats obtenus pour le mode (2,1) par nos propres simulations numériques. a) : densité de puissance spectrale pour le mode 21. b) : fonctions d'auto corrélation.

Sur le panneau a de la figure 8.5, on peut voir les variations de la fonction d'auto-corrélation pour le mode (2,1), celle-ci oscille dans le temps à une fréquence proche de la fréquence hybride haute. On peut aussi voir que l'amplitude de la fonction

d'auto corrélation est amortie dans le temps, ce qui peut être expliqué par le mouvement de diffusion des particules dans le plasma.

Intéressons nous maintenant aux petites longueurs d'ondes en étudiant le mode (2,6), la longueur d'onde de ce mode est comparable au rayon de Larmor, $k\rho = 3.1$.

Nous pouvons voir sur le panneau b de la Figure 8.6 que plusieurs modes d'amplitude comparable sont excités, avec des pics qui se situent approximativement aux fréquences cyclotrons prédites par la théorie linéaire.

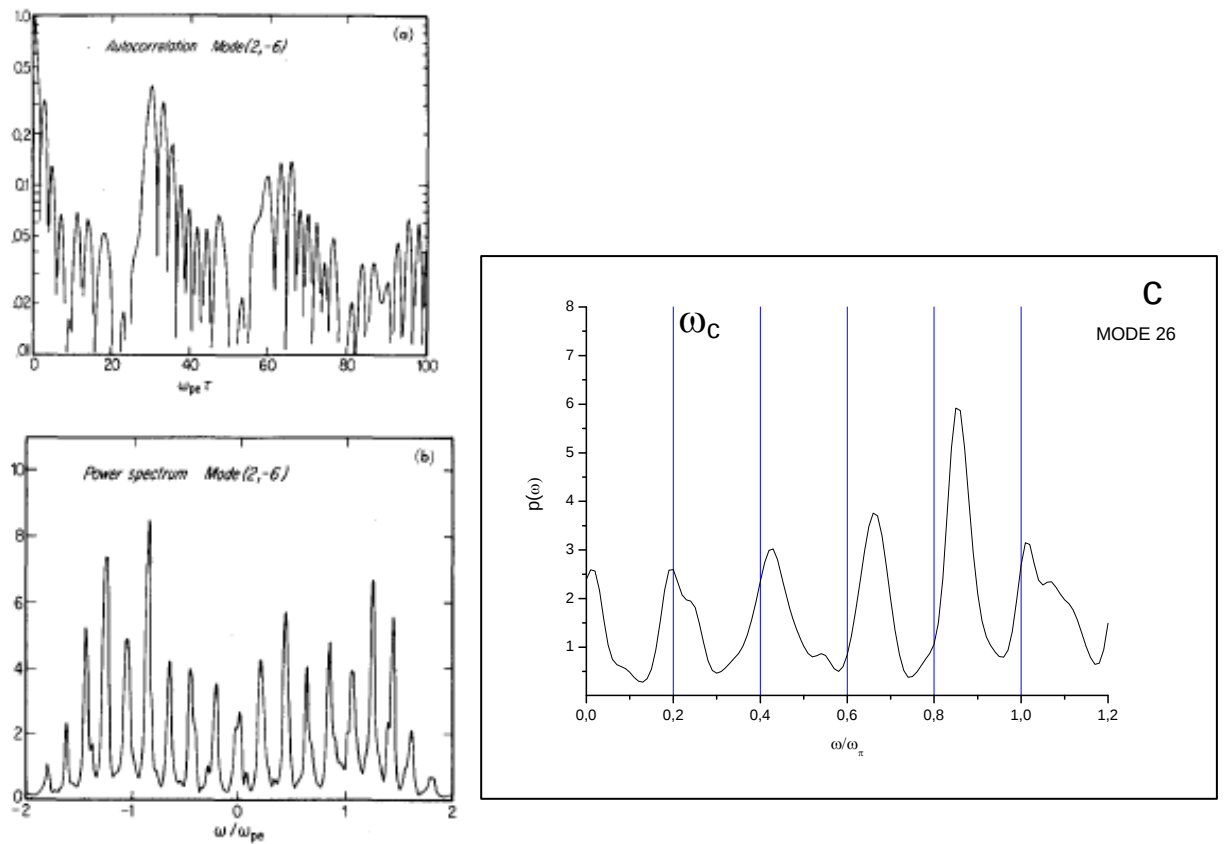


Figure 8.6: Fonction d'auto- corrélation et densité de puissance spectrale pour le mode (2,6).

Panneaux a et b : densité de puissance spectrale et fonction d'auto corrélation d'après Kamimura, 1978, panneau c : vue détaillée du panneau b, obtenu par nos propres simulations numériques, les harmoniques de la gyrofréquence électronique sont représentées en bleu sur la figure.

Sur le panneau a de la Figure 8.6, on peut voir que l'amplitude de la fonction d'auto corrélation est amortie de façon exponentielle sur un temps inférieur à la période de Larmor.

La vue détaillée de la densité de puissance spectrale Figure 8.6c permet de voir la présence de pics d'égale amplitude entre deux gyrofréquences électroniques successives.

Notons que d'autres travaux ont simulé l'excitation des ondes électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ ou « ECH waves ». Ces travaux ont été réalisés en utilisant un code électrostatique à deux dimensions. En l'absence d'observations, Ashour Abdalla et al. (1980) ont simulé ces ondes en utilisant une distribution en cône de perte pour modéliser la source d'énergie libre. Du fait des limitations informatiques de l'époque, la taille du système n'était pas forcément adaptée, mais malgré la présence de bruit numérique, les auteurs ont été capables d'exciter des ondes autour des $(n+1/2)f_{ce}$ et ont montré que ces ondes saturaient par chauffage de la population froide.

En résumé

En rappelant les résultats de Horne et al., (2003), nous avons pu voir que des ondes autour de $(n+1/2)f_{ce}$ peuvent être excitées en utilisant une résolution numérique de l'équation de dispersion dans la théorie linéaire, sans toutefois reproduire la structure fine des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées.

Nous avons utilisé un code particulière 2-1/2D permettant d'introduire des inhomogénéités dans le milieu et donc qui devraient reproduire la structure fine des émissions observées. Avant d'introduire cette inhomogénéité, nous avons commencé par reproduire les résultats de la théorie linéaire. En étudiant l'évolution des densités de puissance spectrale, nous avons pu retrouver la fréquence hybride haute (pic dominant pour le mode (2,1)) ainsi que des pics entre deux gyrofréquences électroniques successives (pics d'égale amplitude pour le mode (2,6)).

Cette application du code particulière reste un simple préliminaire à une étude plus poussée, que nous n'avons pas eu le temps d'entreprendre durant cette thèse.

Afin d'étudier la source d'énergie libre dans le plasma, il serait souhaitable d'introduire une deuxième population de température différente dans la boîte pour étudier la déstabilisation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$.

Enfin la modélisation d'inhomogénéités dans la boîte permettrait de voir si le « feuilletage » des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées est lié à la présence de ces

inhomogénéités ou pas. Inhomogénéités qui par définition ne peuvent être prises en compte dans un code type WHAMP d'où l'intérêt de l'utilisation des codes particules.

Conclusion générale

Les ondes électrostatiques électroniques ont été observées depuis la fin des années soixante dans la magnétosphère terrestre ainsi que dans celles d'autres planètes magnétisées. Diverses études se sont intéressées aux caractéristiques de ces ondes, à leur mécanisme de génération, ainsi qu'à leur possible implication dans la génération des aurores diffuses, sans apporter de réponse définitive quant à cette implication par exemple. Concernant le mécanisme de génération de ces ondes, il est intéressant de relier les modèles proposés pour ce mécanisme avec des données réellement observées. Une étude supplémentaire à l'aide des données de CLUSTER est donc utile, et c'est ce à quoi nous nous sommes attelés dans cette thèse.

Nous nous sommes intéressés aux émissions naturelles reliées à la gyrofréquence électronique observées dans la partie externe de la plasmasphère terrestre à partir des données des quatre satellites CLUSTER. Pour cette étude, nous avons utilisé les données de plusieurs instruments, principalement l'instrument WHISPER pour la mesure des ondes à haute fréquence et l'instrument PEACE pour les signatures de flux électroniques. Nous avons aussi appliqué un code particule de simulation numérique afin de reproduire les modes propres du plasma.

Nous rappelons les principaux résultats obtenus par la caractérisation spectrale, par l'étude statistique et enfin avec les signatures des données électroniques et le code numérique.

- **Caractérisation spectrale**

Nous avons commencé par la caractérisation spectrale des émissions observées dans la plasmasphère à travers des études d'événements. En appliquant la méthode des maxima d'intensité, nous avons pu clairement identifier les différents types d'émissions observées et apporter une clarification aux classifications déjà existante. La bonne résolution de l'instrument WHISPER nous a permis de mettre en évidence la structure fine des émissions équatoriales aux $(n+1/2)f_{ce}$ et d'observer pour la première fois des ondes très fines situées exactement aux multiples de la gyrofréquence électronique f_{ce} .

Concernant les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, nous avons pu voir que celles-ci sont confinées près de l'équateur magnétique. Les observations s'étendent entre $[-3^\circ$ et $+4^\circ]$ de latitude. Ces émissions ont une largeur de bande autour de 3-4 kHz, avec une intensité maximale près de l'équateur magnétique. Nous avons montré que la position en fréquence des émissions équatoriales n'est pas aussi simple qu'il y paraît. Celles-ci ne se situent pas exactement aux demi de l'intervalle, avec des positions différentes pour chaque harmonique supérieure.

L'étude d'événements multi-satellites a permis de montrer l'importance de la distance radiale sur l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ et sur leur nombre d'harmoniques. Nous avons aussi pu mettre en évidence l'importance des structures locales de densité dans l'observation de ces ondes.

En outre, les ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ ont été observées à des latitudes magnétiques plus élevées avec une intensité et une largeur de bande plus faible.

Enfin, les ondes aux nf_{ce} apparaissent systématiquement au dessus de la fréquence plasma locale et présentent une modulation élevée, plusieurs harmoniques peuvent être observées dans les deux hémisphères. Leur intensité est maximale dans une direction perpendiculaire au champ magnétique.

- **Etude statistique**

Après avoir caractérisé ces émissions par des études d'événements, nous avons étudié leurs propriétés de façon plus systématique à travers une analyse statistique.

Un total de 387 passages au périgée sur trois années de données pour le satellite C3 a été traité, de façon visuelle tout d'abord afin de classer les différents types d'émissions et de façon automatique ensuite, pour déterminer les caractéristiques en

fréquence de ces émissions. Nous avons défini les temps caractéristiques de chaque émission afin de définir leur position en latitude magnétique et en MLT pendant les observations.

De cette étude statistique, nous avons pu établir que les émissions aux $n f_{ce}$ sont plus marginales et sont observées dans moins de 10% des passages. Ces émissions semblent répondre à des conditions bien particulières d'observation et sont fortement localisées en MLT. La variation des indices géomagnétiques, sur un intervalle temporel de 24 heures précédant ces observations, n'a pas montré de corrélation avec l'activité géomagnétique. Ces émissions semblent être observées sous une forme bien particulière de plasmasphère dite en « arbre de Noël ».

Les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ sont plus communément observées, avec observations sur près de 68% des passages au périgée. La forte occurrence côté aube confirme les résultats des missions précédentes. Cette étude statistique montre un fort confinement à l'équateur magnétique. Les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ sont observées dans 60% des passages, avec un fort taux d'occurrence dans le secteur crépuscule et une extension en latitude magnétique de 20° en moyenne.

Les taux d'occurrence variables de ces observations selon les secteurs MLT suggèrent que la distance à la plasmopause équatoriale joue un rôle dans l'apparition de ces ondes.

Nous avons défini un indicateur donnant cette distance à la plasmopause, indicateur donné par les propres mesures de densité équatoriale prises par l'instrument WHISPER lors de la traversée de l'équateur magnétique. Cet indicateur a pour avantage de refléter « en temps réel » la distance des satellites à la plasmopause.

Il apparaît que les ondes aux $n(+1/2)f_{ce}$ sont observées pour des valeurs de $f_{p-eq} < 60$ kHz, indiquant que les satellites se trouvent au plus près de la plasmopause, alors que les ondes aux $n(1.1)f_{ce}$ sont observées pour des valeurs de $f_{peq} > 80$ kHz, indiquant que les satellites sont plus à l'intérieur de la plasmasphère.

L'étude de la variation des indices géomagnétiques a montré que les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ nécessitent une activité géomagnétique modérée alors que les émissions aux $n(1.1)f_{ce}$ sont observées pour une activité géomagnétique faible. Ce qui laisse à supposer deux conditions de plasmas différents, nécessitant une perturbation de la plasmasphère

pour les ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, alors que la plasmasphère apparaît comme étant plus stable pour les ondes aux $n(1.1)f_{ce}$.

Enfin l'étude statistique de l'intensité de la première bande des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ indique que celle-ci est la plus intense dans le secteur 22-06 MLT. Ces ondes peuvent ainsi jouer un rôle dans la précipitation des électrons menant aux aurores diffuses. Le pourcentage d'événements intenses est de l'ordre de 32%, ce qui reste tout de même insuffisant pour expliquer la précipitation des électrons à cette latitude (4Rt) observée par CLUSTER.

- **Signatures électroniques**

L'étude des quelques événements pour lesquels PEACE était en fonctionnement lors du passage au péricée a permis de montrer la présence de flux de différentes énergies dans la région équatoriale de la plasmasphère sans montrer de signature particulière corrélée à la présence de ces ondes électrostatiques.

Le suivi chronologique de la fonction de distribution lors d'une étude d'événement n'a pas montré non plus de changement corrélé à l'observation des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, mais a montré un milieu continûment instable dans la région équatoriale. Cette fonction de distribution est en forme de champ aligné par rapport à $\mathbf{B}$ dans le cas d'observation d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ peu intenses et sous forme de pancake dans le cas d'ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ intenses. Nous avons donc deux formes très différentes de la fonction de distribution pour un même type d'émissions autour de $(n+1/2)f_{ce}$, ce qui reste encore à expliquer.

- **Simulation numérique**

Dans ce travail une approche par la simulation particulière 2-1/2 D a été entreprise dans le but de reproduire les structures fines des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ étudiées.

L'introduction d'inhomogénéités dans la boîte de simulation permettrait de reproduire cette structure fine, chose que nous n'avons pas eu le temps d'entreprendre dans cette thèse. Nous nous sommes toutefois familiarisés avec les outils utilisés, en retrouvant à l'aide d'un simple « run » thermique les modes de Bernstein en propagation strictement perpendiculaire.

Toutes ces études ont permis d'améliorer de façon significative les connaissances concernant les ondes observées dans la plasmasphère, en posant une classification claire de celles-ci et en démontrant l'importance de la distance à la plasmapause sur les observations.

Les quelques études des données PEACE ont montré des distributions électroniques de forme instable dans ces régions. Il serait intéressant de modéliser les observations de fonction de distribution par des sommes de maxwelliennes et d'introduire le résultat de cet ajustement dans un code numérique type « WHAMP » afin d'identifier les modes instables, notamment pour reproduire les ondes aux nf_{ce} ou aux $(n+1/2)f_{ce}$. De plus la quantité de données PEACE disponibles au périgée jusqu'en 2009 sera plus importante avec des fonctions de distribution à trois dimensions en mode « burst », ce qui permettra d'avoir plus d'informations sur les populations mises en jeu.

L'extension de l'étude statistique sur les dernières années de la mission CLUSTER permettrait d'avoir une couverture en distance radiale plus étendue, et compléterait nos études notamment pour les émissions aux nf_{ce} qui semblent être liées à une forme bien particulière de plasmasphère.

Une étude statistique sur la structure fine des émissions électrostatiques aux $(n+1/2)f_{ce}$ serait également intéressante et permettrait de répondre aux questions suivantes : Pour quelles valeurs du rapport f_p/f_{ce} apparaissent-elles ? L'écart en fréquence obéit-il à une harmonicité ? Une telle étude statistique permettrait de confirmer la tendance que nous avons observée : plus les émissions sont intenses, plus elles sont feuilletées. Ces informations plus globales sur le feuilletage des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$ permettraient également d'affiner nos paramètres d'entrée pour les simulations numériques.

Annexes

Coordonnées et Paramètres

I. Système de coordonnées

Nous allons décrire dans ce qui suit les systèmes de coordonnées utilisés dans ce manuscrit, ce sont tous des systèmes orthonormés.

I. 1 Le système « géocentrique solaire écliptique » (GSE)

Ce système est centré sur le centre de la Terre, l'axe X dirigé vers le Soleil, l'axe Y est contenu dans le plan de l'écliptique orienté vers le soir et l'axe Z normal à l'écliptique complète le trièdre direct ; le pôle nord appartient au domaine $z > 0$ (Figure A1.1).

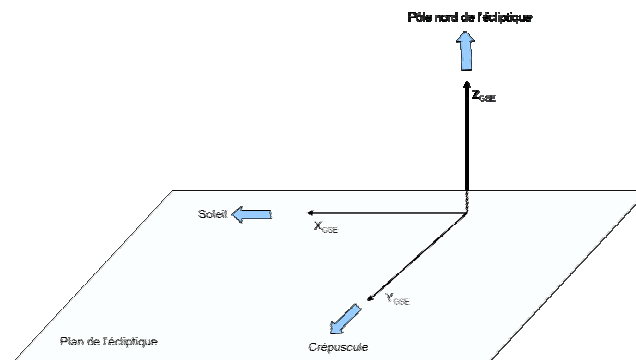


Figure A.1.1 : Repère GSE. L'axe X est dirigé vers le Soleil, l'axe Z est perpendiculaire au plan de l'écliptique.

L'orbite des satellites CLUSTER est polaire, c'est-à-dire qu'elle est perpendiculaire au plan XY_{GSE} .

I. 2 Le système « solaire magnétique » (SM)

Ce système est également centré sur le centre de la Terre, avec l'axe Y perpendiculaire à la direction Terre-Soleil, l'axe Z parallèle à l'axe du dipôle géomagnétique et pointant vers le Nord, et l'axe X complétant le trièdre direct (Figure A.1.2).

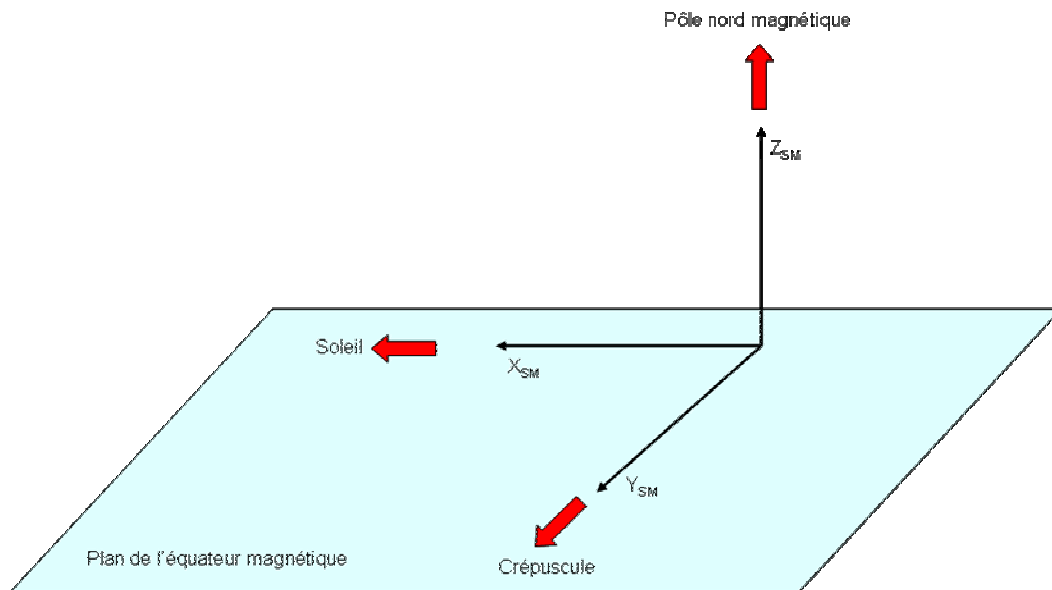


Figure A.1.2 : Repère SM. L'axe X est dirigé vers le Soleil, l'axe Y est dirigé vers le crépuscule, l'axe Z est dirigé vers le pôle nord magnétique.

C'est ce système de coordonnées qui sera adopté tout au long de ce travail.

II. Paramètres

II. 1 Temps Magnétique Local MLT

Le temps local magnétique est défini à partir du système de coordonnées Solaire Magnétique : c'est la longitude dans ce système, du point considéré, mais évaluée en heure considérant que 15^0 correspondent à environ une heure MLT et que 12:00 MLT correspond à la direction de l'axe X-SM dans le sens positif.

II. 2 Paramètre de McIlwain L

Le paramètre de McIlwain L peut être défini comme la distance radiale de l'intersection d'une ligne de champ magnétique dipolaire avec l'équateur magnétique. Par définition

$$L = \frac{R}{\cos^2(\lambda)}$$

Où R est la distance au centre de la Terre et λ la latitude magnétique. La définition devient plus complexe dans le cas général. (McIlwain, 1962).

II. 3 Angle d'attaque

L'angle d'attaque α d'une particule est défini comme l'angle entre le vecteur vitesse de la particule et le vecteur champ magnétique ambiant soit

$\alpha = \tan^{-1}(v_{\perp}/v_{\parallel})$ où $v_{\perp}$ et $v_{\parallel}$ sont les composantes du vecteur vitesse perpendiculaire et parallèle respectivement.

Ondes dans un plasma

I. Caractéristiques générales des plasmas

Un plasma est un milieu constitué de particules chargées (ions et électrons), il est globalement neutre. L'écart des particules par rapport à leur position d'équilibre va créer un mouvement d'oscillation ayant pour fréquence propre la fréquence plasma.

Celle-ci est déterminée par la relation de Poisson, elle est donnée par $f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{nq^2}{\epsilon_0 m}}$

où m est la masse de l'espèce concernée, q sa charge, n sa densité et ϵ_0 la permittivité du vide. Cette relation va permettre de déterminer la densité à travers la valeur de la fréquence plasma.

Si le plasma est magnétisé, ses particules seront soumises à un champ magnétique $\mathbf{B}$ et vont tourner dans le plan perpendiculaire à la direction du champ magnétique, la fréquence de rotation des particules ou fréquence cyclotron s'écrit $f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{q\mathbf{B}}{m}$.

On parle de milieu plasma sur des distances supérieures à la longueur de Debye λ_D . Cette longueur correspond à la distance au-delà de laquelle l'effet d'écran devient

effectif et est donnée par $\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{ne^2}}$, T étant la température du plasma et k_B la constante de Boltzmann.

On peut donc voir que de façon générale, les particules chargées dans un plasma magnétisé vont avoir deux mouvements

Un mouvement d'oscillation à la fréquence plasma f_p .

Un mouvement de rotation à la fréquence cyclotron dans le plan perpendiculaire à la direction du champ magnétique.

II Modes propres du plasma

Pour déterminer les modes propres qui peuvent exister dans un plasma, il est nécessaire de connaître son tenseur diélectrique afin de résoudre l'équation de dispersion et de voir quelles sont les ondes planes de pulsation ω et de vecteur d'onde $\vec{k}$ qui peuvent se propager. Le tenseur diélectrique peut être calculé sous diverses approximations : plasma froid où la température des particules est négligée ou bien en théorie cinétique où les effets de température sont pris en compte. Pour toutes ces approches, le plasma est considéré comme étant magnétisé.

Le calcul en approximation plasma froid est assez simple. Il permet néanmoins de déterminer les fréquences de résonance des modes, résonance à l'hybride haute f_{uh} , à l'hybride basse f_{lh} et mode de Langmuir f_p , ainsi que les fréquences de coupure droite et gauche f_d et f_g . (Quémada, 1968).

Le calcul pour l'approximation cinétique est plus ardu et nécessite une approche numérique afin de déterminer les composantes du tenseur diélectrique. Ces composantes peuvent aussi être calculées de façon analytique par des développements aux limites (Stix, 1992 ; Baumjohann et Treumann, 1996).

Le schéma Figure A2.1 résume les deux approches, avec les équations utilisées dans chacune d'elle.

Pour l'approche plasma froid, les équations de Maxwell et la loi de Lorentz sont utilisées. L'équation de dispersion en plasma froid est donc déduite pour une propagation d'ondes planes avec un angle θ arbitraire entre le vecteur d'onde $\vec{k}$ et le champ magnétique $\mathbf{B}$.

Pour l'approche cinétique, plusieurs méthodes de simulation numérique peuvent être appliquées, celles-ci seront basées soit sur une approche « particules » où le plasma est considéré comme un ensemble de particules sans autres conditions préalables

(Dawson, 1983) ou sur une approche « Fokker-Planck » par laquelle la fonction de distribution des particules est connue ainsi que ces moments. Le calcul du tenseur diélectrique pour un angle θ arbitraire se fait en utilisant les intégrales de Fried et Conte (Fried et Conte, 1961).

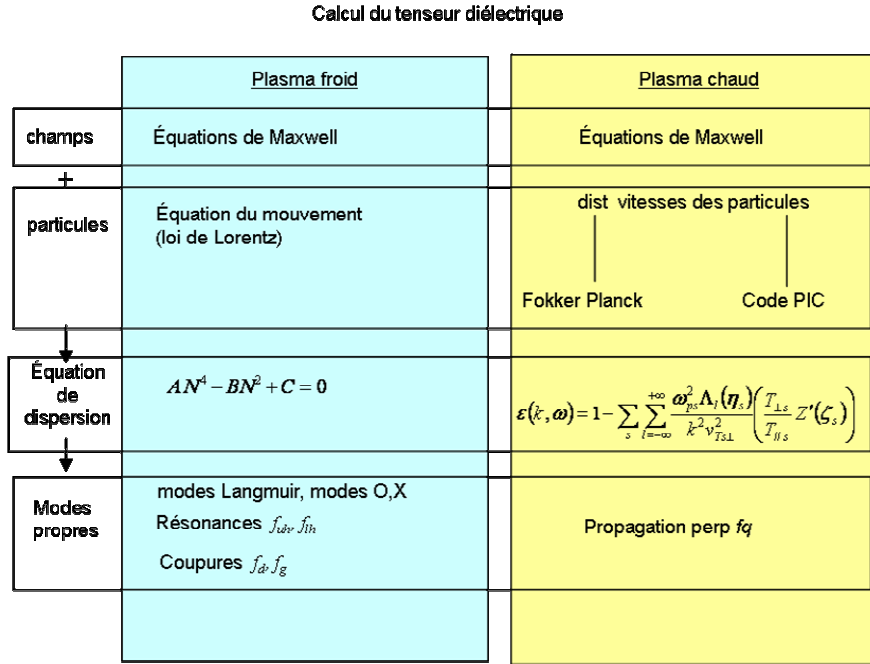


Figure A2.1: Diagramme résumant les différentes approximations pour le calcul du tenseur diélectrique. La fonction $Z(\xi)$ est la fonction de Fried et Conte.

Nous allons détailler dans ce qui suit les calculs dans l'approximation plasma froid, ainsi que le calcul de l'équation de dispersion pour les modes électrostatiques

II.1 Approximation plasma froid

Dans l'approximation plasma froid, la température des particules est négligée. Les particules sont considérées immobiles en l'absence de perturbation.

A partir des équations de Maxwell et de l'équation de mouvement la relation de dispersion va s'écrire sous la forme d'une équation bicarrée avec l'indice de réfraction

$$N = \frac{kc}{\omega} \text{ comme variable, } k \text{ étant le vecteur d'onde et } \omega \text{ la pulsation}$$

$$\text{soit } AN^4 - BN^2 + C = 0.$$

Eq A2.1.

A, B et C sont des coefficients qui dépendent de la pulsation plasma électronique $\omega_{pe} = 2\pi f_{pe}$, à la pulsation cyclotron électronique $\omega_{ce} = 2\pi f_{ce}$, aux pulsations cyclotron des différentes espèces d'ions $\omega_{ci} = 2\pi f_{ci}$ et aux paramètres de l'onde $\omega = 2\pi f$ et θ , représentant la pulsation de l'onde et l'angle entre le vecteur d'onde $\vec{k}$ et le vecteur champ magnétique $\mathbf{B}$.

Pour plus de détails sur les calculs voir (Quémada, 1968; Stix, 1992)

II.1 1 Propagation parallèle

En propagation parallèle, comme on peut le voir sur le diagramme de dispersion (Figure A2.2) plusieurs modes existent. Le mode de Langmuir polarisé linéairement le long du champ magnétique, le mode gauche et le mode droit qui tournent dans le plan perpendiculaire à la direction du champ magnétique. Ces modes présentent des fréquences de coupure et de résonance différentes.

La fréquence de coupure d'un mode est la fréquence à laquelle la norme du vecteur d'onde $\vec{k}$ s'annule. La fréquence de résonance est définie elle comme étant la fréquence à laquelle le vecteur d'onde $\vec{k}$ tends vers l'infini et $k(\omega)$ présente une asymptote horizontale.

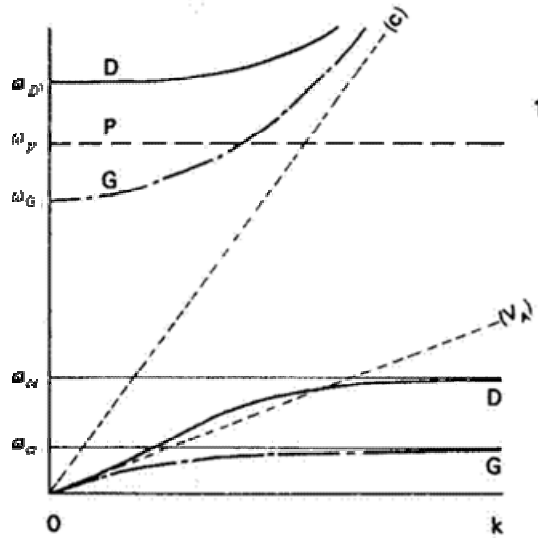


Figure A2.2 : Diagramme de dispersion $k(\omega)$ pour une propagation parallèle (d'après Quemada, 1968). Ce diagramme est valable pour $\omega_p > \omega_c$ et pour un plasma ne contenant qu'un seul type d'ion.

Pour le mode gauche, les fréquences de coupure sont 0 et f_G et la fréquence de résonance f_{ci} .

Ce mode existe donc pour des fréquences comprises entre 0 et f_{ci} et pour toutes les fréquences supérieures à f_g .

De même, le mode droit existe pour des fréquences comprises entre 0 et f_{ce} et pour toutes les fréquences supérieures à f_d .

L'oscillation de Langmuir (mode plasma) n'existe qu'à la fréquence plasma.

Les valeurs de f_g et f_d sont obtenues à partir de la résolution de la relation de dispersion

$$f_G = \frac{1}{2\pi} \frac{-|\omega_{ce}| + \sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}}{2} \quad \text{Eq A2.2}$$

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{|\omega_{ce}| + \sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}}{2} \quad \text{Eq A2.3}$$

II.1.2 Propagation perpendiculaire

En propagation perpendiculaire, les deux modes ordinaire et extraordinaire, notés respectivement O et X existent.

Comme on peut le voir sur la figure A2.3

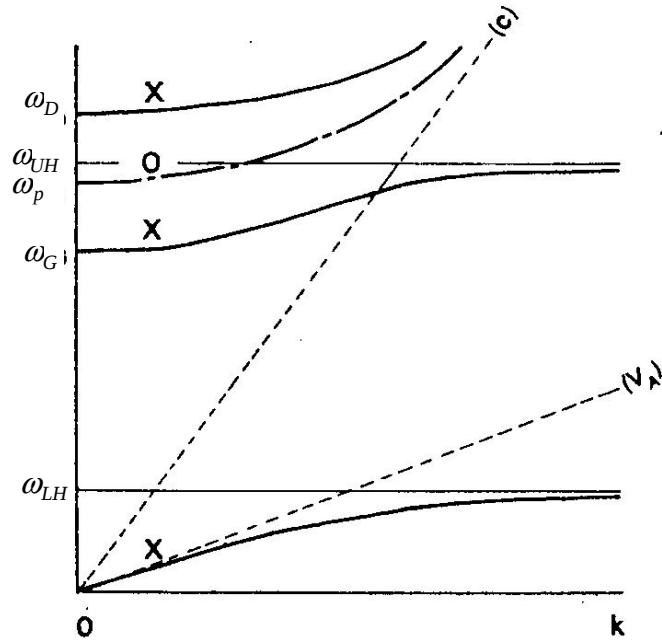


Figure A2.3: Diagramme de dispersion $k(\omega)$ pour une propagation perpendiculaire (d'après Quemada 1968). Ce diagramme est valable pour $\omega_p > \omega_c$ et pour un plasma ne contenant qu'un seul type d'ion.

Le mode O existe pour des fréquences supérieures à f_p avec une coupure à celle-ci et une asymptote à c/ω . Il est polarisé linéairement le long du champ magnétique.

Le mode X a pour fréquence de coupure 0 et pour fréquence de résonance f_{lh} pour la partie basse fréquence. A plus hautes fréquences la coupure de ce mode est à f_d , la branche de dispersion tend vers l'infini pour la partie haute fréquence. Le mode Z est la dénomination du mode X ayant pour coupure la fréquence f_D et pour résonance la fréquence f_p .

Les valeurs de f_g et f_p sont les mêmes qu'en propagation parallèle, les valeurs de f_{uh} et f_{lh} sont données par

$$f_{UH} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2} \quad \text{Eq A2.4}$$

$$f_{LH} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega_{pe}^2 + \omega_{ce} \omega_{ci}}{\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2}} \omega_{ce} \omega_{ci} \quad \text{Eq A2.5}$$

II. 2 Approche cinétique pour l'établissement de l'équation de dispersion

Dans la théorie plasma chaud, les particules ne sont plus considérées comme immobiles mais ont chacune une certaine agitation thermique.

Pour prendre en compte l'agitation thermique, les fonctions de distribution des vitesses des particules sont calculées.

La fonction de distribution obéit à l'équation de Vlasov linéarisée :

$$\left(\partial_t + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}_r + \frac{q}{m} \vec{v} \times \vec{B}_0 \cdot \vec{\nabla}_r \right) F_1(\vec{r}, \vec{v}, t) = -\frac{q}{m} (\vec{E}_1 + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \nabla_v F_0(\vec{r}, \vec{v}, t) \quad \text{Eq A2.6}$$

Où F_0 est la fonction de distribution non perturbée.

Nous en déduisons ensuite le tenseur de conductivité qui est un moment de cette fonction de distribution. La densité de courant est donnée par

$$\vec{J}(\vec{r}, t) = \sum_{e,i} n(\vec{r}, t) q \langle \vec{v} \rangle = \sum_{e,i} q \int \vec{v} f(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3 \vec{v} \quad \text{Eq A2.7}$$

Après quelques calculs ardues pour les intégrales de la fonction de distribution, le tenseur diélectrique du plasma va s'écrire (voir Baumjohann et Treumann, 1996 entre autres)

$$\varepsilon(\vec{k}, \omega) = \left(1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2} \right) \vec{I} - \sum_s \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} \frac{2\pi\omega_{ps}^2}{n_{0s}\omega^2} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v_{\perp} dv_{\perp} dv_{\parallel} \left(k_{\parallel} \frac{\partial F_{0s}}{\partial v_{\parallel}} + \frac{l\omega_{cs}}{v_{\perp}} \frac{\partial F_{0s}}{\partial v_{\perp}} \right) \frac{\vec{S}_{ls}(v_{\parallel}, v_{\perp})}{k_{\parallel} v_{\parallel} + l\omega_{cs} - \omega} \quad \text{Eq A2.8}$$

La sommation sur s porte sur les différentes espèces de particules chargées avec

$$\vec{\bar{S}}_{ls}(v_{//}, v_{\perp}) = \begin{pmatrix} \frac{l^2 \omega_{cs}^2}{k_{\perp}^2} J_l^2 & i \frac{lv_{\perp} \omega_{cs}}{k_{\perp}} J_l J_l' & \frac{lv_{//} \omega_{cs}}{k_{\perp}} J_l^2 \\ -i \frac{lv_{\perp} \omega_{cs}}{k_{\perp}} J_l J_l' & v_{\perp}^2 J_l'^2 & -iv_{//} v_{\perp} J_l J_l' \\ \frac{lv_{//} \omega_{cs}}{k_{\perp}} J_l^2 & iv_{//} v_{\perp} J_l J_l' & v_{//}^2 J_l'^2 \end{pmatrix} \quad \text{Eq A2.9}$$

Le vecteur d'onde $\vec{k} = (k_{\perp}, 0, k_{//})$ est situé dans le plan (x, z) . Les fonctions J_l sont les fonctions de Bessel d'ordre l et d'argument $\zeta_s = \frac{k_{\perp} v_{\perp}}{\omega_{cs}}$ et $J_l' = \frac{dJ_l}{d\zeta_s}$.

Des résonances vont apparaître aux pôles de l'intégrant du tenseur diélectrique. Ils correspondent à $l = 0$ (cas du pôle de Landau dans le cas d'un plasma isotrope), mais aussi à la fréquence cyclotron de chaque espèce ainsi qu'à toutes ses harmoniques.

En reportant cette expression du tenseur diélectrique dans l'équation de dispersion générale, nous en déduisons les modes électromagnétiques et électrostatiques d'un plasma chaud homogène.

Pour des modes purement électrostatiques le tenseur diélectrique va s'écrire

$$\varepsilon(\vec{k}, \omega) = 1 - \sum_s \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} \frac{2\pi\omega_{ps}^2}{n_{0s}k^2} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v_{\perp} dv_{\perp} dv_{//} \left(k_{//} \frac{\partial F_{0s}}{\partial v_{//}} + \frac{l\omega_{cs}}{v_{\perp}} \frac{\partial F_{0s}}{\partial v_{\perp}} \right) \frac{J_l^2(\zeta_s)}{k_{//}v_{//} + l\varepsilon_s\omega_{cs} - \omega} \quad \text{Eq A2.10}$$

$$\text{avec } \zeta_s = \frac{k_{\perp} v_{\perp}}{\omega_{cs}}$$

En supposant une fonction de distribution Maxwellienne, avec des températures différentes dans les directions parallèles et perpendiculaire

$$F_0 = n_0 \left(\frac{m}{2\pi k_B T_{//}} \right)^{1/2} \left(\frac{m}{2\pi k_B T_{\perp}} \right) \exp \left[- \left(\frac{mv_{//}^2}{2k_B T_{//}} + \frac{mv_{\perp}^2}{2k_B T_{\perp}} \right) \right]$$

Le tenseur diélectrique va s'écrire alors

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 - \sum_s \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \frac{\omega_{ps}^2 \Lambda_l(\eta_s)}{k^2 v_{Ts\perp}^2} \left(\frac{T_{\perp s}}{T_{\parallel s}} Z'(\zeta_s) \right) \quad \text{Eq A2.11}$$

Où Z est la fonction de dispersion du plasma ou fonction de Fried et Conte (Fried et Conte, 1961) définie par

$$Z(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-z^2)}{z - \zeta} dz \quad \text{et } Z' \text{ sa dérivée donnée par } Z'(\zeta) = -2[1 + \zeta Z(\zeta)]$$

La fonction Λ est donnée par $\Lambda_l(\eta_s) = I_l(\eta_s) \exp(-\eta_s)$ $\eta_s = \frac{k_{\perp}^2 v_{Ts\perp}^2}{2\omega_{cs}^2}$ et $\zeta = \frac{\omega - l\omega_{cs}}{k_{\parallel} v_{Ts\parallel}}$.

I_l est la fonction de Bessel modifiée de première espèce définie par $I_l(z) = J_l(iz)/i^l$.

II.2.1 Les ondes de plasma électrostatiques en propagation parallèle

Pour une propagation parallèle, l'équation du tenseur diélectrique devient

$$\varepsilon(\vec{k}, \omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{k^2 v_{th}^2} \Lambda_0(\eta_e) Z'(\xi_e) = 0 \quad \text{Eq A2.12}$$

En développant cette expression à l'infini, nous obtenons

$$1 - \frac{\omega_{pe}^2}{k^2 v_t^2} \frac{\Lambda_0}{\xi^2} \left[1 + \frac{3}{\xi^2} - \frac{2i\pi^{1/2}}{\xi} \exp(-\xi^2) \right] = 0 \quad \text{Eq A2.13}$$

Cette expression est valable pour les oscillations Langmuir.

La solution réelle, et dans l'hypothèse d'un amortissement faible s'écrit

$$\omega_l^2(k, \omega) = \omega_p^2 \Lambda_0(\eta_e) \cos^2 \theta [1 + 3k^2 \lambda_D^2 \cos^2 \theta]$$

Pour l'amortissement Landau, l'hypothèse est que les ondes sont amorties dans une région où Λ_0 est suffisamment élevée.

L'équation de dispersion s'écrit donc

$$\omega_l^2(k, \omega) = \omega_{pe}^2 \cos^2 \theta \left[1 + 3k^2 \lambda_D^2 \cos^2 \theta \left(1 - \frac{T_{\perp}}{6T_{\parallel}} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}^2} \tan^2 \theta \right) \right] \quad \text{EqA2.14}$$

Cette relation de dispersion est similaire à celle obtenu en plasma froid pour les ondes de Langmuir, on peut voir que les ondes de Langmuir se propagent dans la direction parallèle au champ magnétique.

II. 2.2 Ondes longitudinales en propagation perpendiculaire

Dans cette propagation, nous pouvons voir de nouveaux modes de propagation, appelés ondes de Bernstein. En se limitant aux ondes de haute fréquence, l'équation de dispersion s'écrit

$$1 - \frac{\omega_p^2}{k_{\perp}^2} \frac{m^2}{k_B^2 T^2} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{l\omega_c}{\omega - \omega_c} \int_0^{+\infty} v_{\perp} dv_{\perp} J_l^2(\eta) \exp\left(-\frac{v_{\perp}^2}{v_{\perp T}^2}\right) = 0$$

En intégrant sur la vitesse perpendiculaire et en utilisant la formule de Weber

$$\int_0^{\infty} x dx J_l^2(px) \exp(-q^2 x^2) = \frac{1}{2q^2} I_l\left(\frac{p^2}{2q^2}\right) \exp\left(-\frac{p^2}{2q^2}\right)$$

L'équation de dispersion devient

$$1 - \frac{\omega_p^2}{k_{\perp}^2} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{I_l(\eta)}{\eta(\omega - l\omega_c)} \exp(-\eta) = 0 \quad \text{avec } \eta = \frac{k_{\perp}^2 v_T^2}{2\omega_c^2}$$

Cette équation se simplifie encore en utilisant $I_l = I_{-l}$

$$1 - \frac{\omega_p^2}{k_\perp^2} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l^2 I_l(\eta)}{\eta(\nu^2 - l^2)} \exp(-\eta) = 0$$

Eq A2.15

$$\text{avec } \nu = \frac{\omega}{\omega_c} \text{ et } \eta = \frac{k_\perp^2 v_T^2}{2\omega_c^2}$$

Nous pouvons voir dans cette équation qu'il n'y a pas d'amortissement (pas de partie imaginaire dans l'équation A2.15).

Cette équation est l'équation de dispersion des ondes cyclotroniques électroniques appelées couramment ondes de Bernstein électroniques (Bernstein, 1958). Ce type d'ondes connaît une atténuation importante dès que la direction de propagation s'écarte de la perpendiculaire au champ magnétique.

Pour $(k_\perp \rightarrow \infty)$, c'est-à-dire $(\eta \rightarrow \infty)$

$$I_l(\eta) \exp(-\eta) = \frac{\exp(-l^2/2\eta)}{\sqrt{2\pi\eta}} \rightarrow 0 \text{ ce qui indique que les résonances ont lieu pour}$$

$\nu = l$, c'est-à-dire aux harmoniques de la gyrofréquence. Les coupures sont elles données par $(k_\perp, \eta \rightarrow 0)$.

Le développement limité à l'infini de I_l $I_l(\eta) = \frac{\eta^l}{2l!}$ conduit à l'équation de dispersion

$$1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2} \sum_{l=1}^{+\infty} \frac{l(\eta^{l-1})}{(l-1)!(\eta^2 - l^2)} = 0$$

Lorsqu'on tient compte de la température, l'équation de dispersion présente une branche pour chaque gyrofréquence. Chaque branche contient une solution $\omega(k)$ de l'équation de dispersion (voir Figure A2.4).

A partir d'un certain rang d'harmonique $n(\omega_n > \omega_{uh})$, la solution $\omega(k)$ est telle que :

$$\begin{aligned} \omega &\rightarrow \omega_{cn} \quad \text{si} \quad k \rightarrow 0 \\ \omega &\rightarrow \omega_{cn} \quad \text{si} \quad k \rightarrow \infty \\ \exists \quad k_{nq} \quad \text{tel} \quad \text{que} \quad \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k=k_{nq}} &= 0 \end{aligned}$$

Les ondes correspondant aux points (k_{qn}, ω_{qn}) sont appelées ondes de Bernstein f_q .

La Figure A2.4 représente le diagramme de dispersion des ondes de Bernstein, pour différentes valeurs 1, 3, 5, 8 et 10 du rapport f_p/f_{ce} (f_p étant la fréquence plasma et f_{ce} la fréquence cyclotron).

A chaque valeur entière du rapport f_p/f_{ce} correspond une branche solution de l'équation de dispersion. Les courbes repérées par les rapports '1', '3' et '5' présentent un maximum à partir de la branche 2, les courbes '8' et '10' à partir de la branche 3.

A chacun des cinq rapports considérés correspond une fréquence hybride haute dont l'abscisse est dans ce cas nulle (approximation d'une vitesse thermique nulle), qui se trouve:

- dans la première branche dans le cas du rapport '1'
- pour les autres rapports, dans la branche suivante présentant un maximum

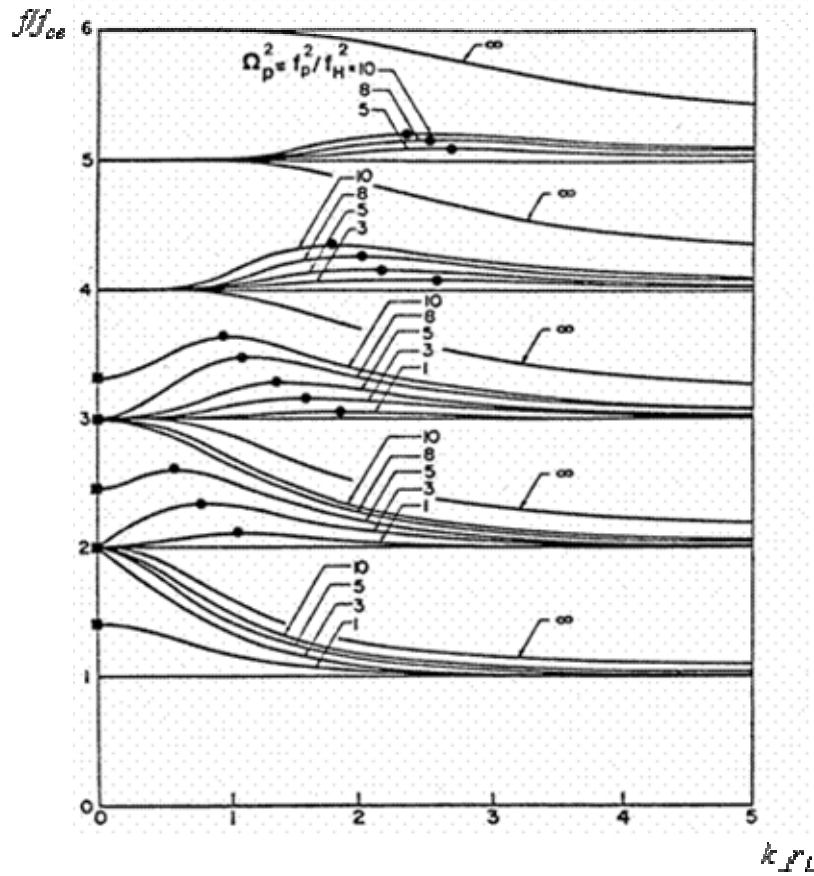


Figure A2.4: Diagramme de dispersion pour une propagation perpendiculaire dans un plasma maxwellien, d'après Tataronis et Crawford, 1970. Différentes valeurs du rapport f_p / f_{ce} sont envisagées. En abscisse figure le vecteur d'onde normalisé au rayon de Larmor, $r_l = v_{th} / 2 f_h$. Les fréquences de résonance hybride haute sont repérées par des carrés (■) et les fréquences de résonance f_{qn} par des points (•).

Codes particules et fonction d'autocorrélation

Dans cette annexe, nous allons présenter les codes particules électrostatiques et leurs équations caractéristiques.

Modèle particule pour le plasma (modèle électrostatique)

Dans un code particule, un plasma est modélisé par un ensemble de particules chargées dans une boîte de simulation

Les particules sont soumises à leurs champs auto consistant. Pour une particule à une position r_j , on peut calculer le potentiel ϕ et le champ électrique E à travers l'équation de Poisson

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi q \delta(r - r_j) \quad \text{Eq A3.1}$$

$$E = -\nabla \Phi$$

Où $\nabla = \sum_{\sigma=1}^n e_{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_{\sigma}}$ et $\nabla^2 = \sum_{\sigma=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_{\sigma}^2}$, n étant la dimension et e_{σ} et x_{σ} les vecteurs unités

dans la direction σ et la coordonnée σ (voir Dawson, 1983).

Le champ électrique déterminé à partir de l'équation A3.1 est donné par

$$E(x) = \frac{2\pi q(x - x_j)}{|x - x_j|}$$

$$E(r) = \frac{2q(r - r_j)}{|r - r_j|^2} \text{ pour une, deux ou trois dimensions respectivement.}$$

$$E(r) = \frac{q(r - r_j)}{|r - r_j|^3}$$

La force en une particule i due aux autres particules est donnée par

$$F_i = q_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}} E_{ij}$$

Et son équation du mouvement donné par

$$\ddot{r}_i = \frac{q_i}{M_i} \sum_{j \neq i} E_{ij} \frac{q_j}{M_j} \sum_j \frac{q_j (r_i - r_j)}{|r_i - r_j|^n}; \text{ Comme on parle d'un code électrostatique, les forces}$$

magnétiques ne sont pas prises en compte.

Comme dans un plasma traditionnel, les particules peuvent être soumises à des collisions. Cet effet est réduit en introduisant le concept de particules de taille finies, qui ont une charge non ponctuelle mais déterminée par un facteur de forme (Langdon et Birdsall, 1970).

Les équations de Poisson vont s'écrire dans l'espace de Fourier sous la forme

$$k^2 \phi(k) = 4\pi \rho(k)$$

$$\phi(k) = 4\pi \rho(k) / k^2$$

$$E(k) = \frac{-4\pi i k}{k^2} \rho(k)$$

$$\rho(k) \approx S(k) \sum_g [Q(r_q) - ikD(r_g)] e^{-ikr_g}$$

$$\rho(k) = S(k) [FFTQ(r_q) - ikFFTD(r_g)].$$

La transformée de Fourier donne les champs en chaque point grille. La taille finie des particules est prise en compte à travers la transformée de Fourier du facteur de forme.

Une charge est modélisée en utilisant un partage de la distribution des charges sur les 4 points grilles environnant, de façon à ce que la somme des charges et le moment dipolaire soient les mêmes au centre de la grille. (Voir schéma figure A3.1)

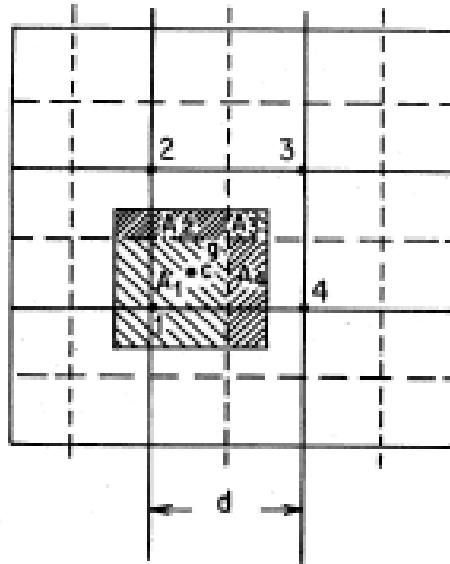


Figure A3.1 : Partage des charges sur les différents points grille.

Pousseur de particules

Les équations du mouvement pour une particule labellisée j sont

$$\frac{dv_j}{dt} = \frac{F(r_j, t)}{m_j} + \frac{q_j}{m_j c} (v_j \times B_0)$$

$$\frac{dr_j}{dt} = v_j(t)$$

L'itération sur les v_j et r_j est faite en utilisant un schéma standard leapfrog (Buneman, 1959).

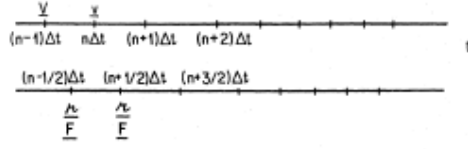


Figure A3.2 : Shéma Leapfrog

Les équations du mouvement vont s'écrire en utilisant un schéma aux différences centrées en temps

$$\frac{v_j^{n+1} - v_j^n}{\Delta t} = \frac{F(r_j, t)}{m_j} + \frac{q_j}{m_j c} (v_j \times B_0) \times \omega_{cj}, \quad \omega_{cj} = \frac{q_j B_0}{m_j c}$$

$$\frac{r_j^{n+1/2} - r_j^{n-1/2}}{\Delta t} = v_j^n$$

Où n est le pas en temps, les vitesses sont données sur les itérations entières, alors que les positions sont données aux itérations demi-entieres.

Fonctions d'autocorrélation

Afin d'exploiter les résultats des simulations obtenus par le code particule, il est possible de calculer la fonction d'auto-corrélation et la densité spectrale d'énergie. Les modes de Fourier sont enregistrés le long de la simulation sur tous les pas de temps afin d'avoir la meilleure résolution en fréquence.

La fonction d'auto-corrélation pour un grand intervalle temporel τ de fluctuations stationnaires de champ électrique E est donnée par (Kamimura, 1978)

$$C_k(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} dt E_k(t) E_k^*(t + \tau)$$

La densité spectrale d'énergie est donnée par

$$P_k(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau C_k(\tau) \exp(i\omega\tau)$$

La fonction d'auto-corrélation est calculée en supposant des fluctuations temporelles du champ et en sommant sur tout les pas de temps

$$C_k(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} E_k(n\Delta t) E_k^*[(n+r)\Delta t], \quad \text{avec } r = 0, 1, \dots, m$$

où r est le lag, m le maximum du lag, N le nombre de point itérés.

La fonction d'auto-corrélation discrète est calculée en utilisant les transformées de Fourier. N est donc choisi comme étant une puissance de 2, c'est-à-dire que $N \equiv 2^k$ où k est un nombre entier.

Il est possible de choisir les points d'intégration afin d'éviter les fluctuations numériques sur les premières itérations temporelles.

La fonction d'auto-corrélation $C_k(\tau)$ est une fonction avec une partie imaginaire quasi nulle (variations du champ électrique stationnaires).

La densité spectrale d'énergie peut être calculée en utilisant la transformée de Fourier de la série des $C_k(r\Delta t)$ et en approximant celle ci par la fonction de Parzen, (Kamimura, 1978), donnée par

$$W(r\Delta t) = \begin{cases} 1 - 6(r/m)^2 + 6(r/m)^3, & r = 0, 1, 2, \dots, m/2 \\ 2(1 - r/m)^3, & r = m/2 + 1, \dots, m \\ 0, & r > m \end{cases}$$

La fonction de densité spectrale a été calculée seulement pour des fréquences discrètes $\omega = l\Delta\omega$, où l est l'harmonique et $\Delta\omega = 2\pi/m\Delta t$ la résolution en fréquence pour la densité spectrale d'énergie. La densité spectrale d'énergie $P_k(l\Delta\omega)$ est donc calculée à travers la transformée de Fourier discrète du produit $W(r\Delta t)C_k(r\Delta t)$.

Articles Publiés

I Article 1

F. El-Lemdani Mazouz, J. L. Rauch, P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, X. Vallières, F. Darrouzet, P. Canu and X. Suraud

Wave emissions at half electron gyroharmonics in the equatorial plasmasphere region: CLUSTER observations and statistics

Adv. Space Res., in press 2008
doi:10.1016/j.asr.2008.06.007



Available online at www.sciencedirect.com



Advances in Space Research xxx (2008) xxx–xxx

**ADVANCES IN
SPACE
RESEARCH**
(a COSPAR publication)

www.elsevier.com/locate/asr

Wave emissions at half electron gyroharmonics in the equatorial plasmasphere region: CLUSTER observations and statistics

F. El-Lemdani Mazouz^{a,*}, J.L. Rauch^a, P.M.E. Décréau^a, J.G. Trotignon^a,
X. Vallières^a, F. Darrouzet^b, P. Canu^c, X. Suraud^a

^aLaboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE), *Department of Physics*,
3A Avenue de la recherche Scientifique, 45071 Orléans Cedex 02, France

^bBelgian Institute for Space Aeronomy (IASB-BIRA), 3 Avenue Circulaire, 1180 Brussels, Belgium

^cCentre d'études des Environnements Terrestres et Planétaires (CETP), 10–12 Avenue de l'Europe, 78140 Vélizy-Villacoublay, France

Received 16 November 2007; received in revised form 26 May 2008; accepted 6 June 2008

Abstract

Intense $(n + 1/2)f_{ce}$ emissions are a common phenomenon observed in the terrestrial inner magnetosphere. One of their interests is their possible effect in the pitch angle scattering of plasmasheet keV-electron, leading to diffuse auroras. In this paper, we present CLUSTER's point of view about this topic, in the equatorial region of the plasmasphere, via a statistical study using 3 years of data. Spectral characteristics of these waves, which represent an important clue concerning their generation mechanism, are obtained using WHISPER data near perigee. Details on the wave spectral signature are shown in an event study, in particular their splitting in fine frequency bands. The orbit configuration of the four spacecraft offers a complete sampling on all MLT sectors. A higher occurrence rate of the emissions in the dawn sector and their confinement to the geomagnetic equator, pointed out in previous studies, are confirmed and described with additional details. The proximity of emission sites, both to the plasmopause layer and to the geomagnetic equator surface, seems to be of great importance in the behaviour of the $(n + 1/2)f_{ce}$ wave characteristics. Our study indicates for the first time, that both the intensity of $(n + 1/2)f_{ce}$ emissions, and the number of harmonic bands they cover, are increasing as the observation point is located further away outside from the plasmopause layer. Moreover, a study of the wave intensity in the first harmonic band (near $3/2f_{ce}$) shows higher amplitude for these emissions than previous published values, these emissions can play a role in the scattering of hot electrons. Finally, geomagnetic activity influence, studied via time series of the D_{st} index preceding observations, indicates that $(n + 1/2)f_{ce}$ emission events are observed at CLUSTER position under moderate geomagnetic activity conditions, no specific D_{st} time variation being required.

© 2008 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Electron cyclotron harmonic waves; Plasmasphere; Diffuse aurora

1. Introduction

Electron cyclotron harmonic (ECH) waves of various types have been observed in space since the advent of in situ measurements: in the Earth magnetosphere (Kennel et al., 1970; Christiansen et al., 1978; Olsen et al., 1987; Usui et al., 1999), as well as in the vicinity of other planets (Kurth and Gurnett, 1991). These emissions have been also observed in plasma laboratory (Krafft et al., 1992). Classi-

fications of terrestrial ECH waves have been proposed, according to the available coverage of observations offered by the different spacecraft and their instrumentation (Hubbard and Birmingham, 1978, on IMP 6; Gough et al., 1979, on GEOS 2). Main classification criteria are the intensity and the frequency range of the emissions. In parallel with observations, and sometimes in advance from those, a large number of theoretical studies have been produced, concerning both the generation mechanisms of ECH waves, and their effects on the magnetospheric electron population. Kennel and Ashour-Abdalla (1982) published a comprehensive review of possible causes and effects.

* Corresponding author.

E-mail address: mazouz@cnsr-orleans.fr (F. El-Lemdani Mazouz).

In this paper, we present CLUSTER observations of one type of terrestrial ECH waves, namely intense $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions, where f_{ce} is the local electron gyrofrequency, such as those which have been reported to be observed in the inner magnetosphere (radial distance below $\sim 12 R_E$), strongly confined to the geomagnetic equator (Gough et al., 1981). An important possible effect of these intense emissions is to operate a pitch angle diffusion of plasmasheet keV-electrons, and consequently their precipitation into the auroral ionosphere (Kennel et al., 1970; Lyons, 1974). Further studies (Belmont et al., 1983; Fontaine et al., 1986) have questioned, without excluding it, the hypothesis of responsibility of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions to operate strong pitch angle diffusion. Other works address the same question. Roeder and Koons (1989), from a statistical study using SCATHA and AMPTE IRM plasma wave data, drove a conclusion in agreement with Belmont et al. (1983). They show that amounts of intense equatorial $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions are grossly insufficient to account for the diffuse auroral precipitation by quasi-linear pitch angle diffusion. In contrast, Horne et al. (2003), analysing a weak substorm injection event, and exploring the effects of propagation in a non homogeneous medium, find out that ECH waves resonate with electrons over a wide range of energies (from hundred of eV to a few keV), producing probably the major contribution to diffuse auroral precipitation for this substorm event.

The first motivation to the present study is to complete the observational data sets accumulated from last century's spacecraft, with CLUSTER wave data, in order to possibly open a new discussion of the questioned hypothesis. The second motivation deals with the origin of the waves, rather than with their consequences. We mainly describe the context of occurrence and intensity variations of the CLUSTER observed $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions on a statistical basis. We discuss also the possible role in the apparition of these emissions of cold to warm electrons density ratio, of gradient density and of free energy sources. We present in addition, from event studies, some details of the wave spectral signature collected with WHISPER instrument on board CLUSTER. Those signatures have been shown from theoretical studies to be of importance in the search of the generation mechanism. Let us precise that we exclude in this study the waves at and above the upper hybrid frequency f_{uh} , sometimes associated to the lower frequency range of ECH emissions, but of different nature according to the shape of Bernstein mode dispersion relation (Bernstein, 1958).

The observations of the multi-satellite CLUSTER mission offer a useful complement to observational data sets acquired in the past. One difficulty encountered by spacecraft with low or moderate inclination has been their tendency to sample the emissions of interest, strongly confined in magnetic latitude ($< \pm 2^\circ$), in an uneven way (see Hubbard et al., 1979, for IMP6 view; Gough et al., 1981, for GEOS 1 and GEOS 2 view; Roeder and Koons, 1989, for SCATHA and AMPTE IRM view). Indeed, with spacecraft of high eccentricity, like IMP 6, the null magnetic latitude is often

reached at an inconvenient radial distance, outside of the radial range of the emissions (which are confined not far outside the plasmasphere). With spacecraft of small eccentricity but low inclination (SCATHA, GEOS 2), the maximum wave intensity can sometimes be missed, or sampled at an unknown part of the orbit, due to fluctuations in an unknown way of the real instantaneous magnetic configuration. In contrast, the polar orbit of CLUSTER (Escoubet et al., 1997), crosses the geomagnetic equator clearly and quickly around perigee (near $4 R_E$, with an orbital period of 57 h) during the years 2002–2004 (period analysed). This property, combined with the good time resolution of the instruments, allows to sort out orbits with or without equatorial $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions and precisely measure their equatorial intensity. The counter part is a quite limited radial exploration (less than $0.5 R_E$). The radial average position (around $4 R_E$) is, however, most of the time close to the plasmasphere boundary layer region (Carpenter and Lemaire, 2004), not far from the inner edge of the plasmasheet electrons (Horwitz et al., 1986), i.e. where the phenomena of interest are taking place.

In this work, we show that the large majority of CLUSTER orbits are able to observe equatorial $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions. Moreover, the orbit evolution during 1 year offers a complete and regular MLT sampling, repeated during the 3 years analysed. Another useful complement of CLUSTER data set is to offer a multipoint view, within a short-time separation (of order 1 h), of the same event at small radial separation. This reveals the important role of radial distance to sort out cases of multi-harmonic ECH emissions, at $(n + 1/2) f_{ce}$, from cases of single harmonic (monotonic) ones, at $3/2 f_{ce}$ only.

The data analysed and presented in this study are a set of electric field frequency spectra measured near the equatorial plasmapause layer by the Wave of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation (WHISPER) instrument (Décreau et al., 1997) on board the four CLUSTER spacecraft. WHISPER instrument enables the observation of various natural emissions in the plasmasphere region (Canu et al., 2001), in particular the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions (El-Lemdani Mazouz et al., 2006). We begin in Section 2 with a presentation and a discussion of the spectral properties of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions, via an event study. In Section 3, we present statistics over the 2002–2004 period. The occurrence rate of the equatorial $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions and their MLT localization are studied and discussed, as well as the intensity of the first harmonic band of these waves. Finally, the time correlation of the apparition of these emissions with geomagnetic activity time variation is investigated via the D_{st} index. Section 4 summarizes the main findings from this study.

2. WHISPER observations of equatorial electron cyclotron harmonics

Before studying the statistical properties of the intense equatorial $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions recorded on CLUSTER,

we briefly show typical signatures of natural emissions observed in the plasmasphere, using an event study. As mentioned above, the data analysed are electric field frequency spectra measured by the WHISPER instrument (Décreau et al., 1997, 2001) combined with the Electric Field and Wave (EFW) instrument (Gustafsson et al., 1997), the latter providing the sensors and antenna (a double sphere dipole), and the former the receiving and spectral analysis chain. In addition to the measurements of natural emissions, the WHISPER instrument yields a diagnosis of the plasma frequency f_p and of the gyrofrequency f_{ce} using a sounding technique. In the inner magnetosphere, where the plasma is significantly magnetized ($3 < f_p/f_{ce} < 10$), a careful analysis of the information contained in the frequency pattern of plasma resonances, triggered locally by the sounder, yields not only the total electron density, but also the density of the cold part of the electron population. As an example, the analysis of an event taken in the noon sector, close to perigee (Trotignon et al., 2003), indicates a cold component equal to about 95% of the total electron component in the plasmasphere, and to about only 60% in the region located just outside.

Natural waves measured by the WHISPER instrument are presented in Fig. 1 for a perigee pass on August 7th, 2003. A colour coded frequency–time spectrogram (left panel) displays the general wave behaviour along the orbit of the CLUSTER spacecraft, C4, and a frequency spectrum (right panel) shows detailed spectral features observed near the geomagnetic equator. From 06:15 to 10:00 UT, the CLUSTER constellation crosses the outer plasmasphere, at ~ 14 MLT, and between -55° and $+55^\circ$ magnetic latitude (Lat_{SM}). The latitude and MLT values are calculated in Solar Magnetic (SM) coordinates, using the model of Tsyanenko and Stern (1996). The plasma frequency, plotted as a white solid line, rises and falls with time, reaching a maximal value of ~ 60 kHz near geomagnetic equator, crossed around 08:09 UT. The short increase

of plasma frequency at 08:04 UT (before the equator crossing), from ~ 60 to ~ 70 kHz, indicates a short incursion earthward from a sharp plasmopause knee (or a local structure), located at an L shell of about $4.5 R_E$. The otherwise smooth variation of the plasma frequency along the orbit is quasi identical for the four spacecraft. Since they are configured in this case in a small formation (200 km average spacecraft separation), and despite a constellation very elongated along the orbit near perigee, it is possible to evaluate spatial gradients of measured physical parameters (Darrouzet et al., 2006; De Keyser et al., 2007). The magnitude of the density gradient vector culminates near geomagnetic equator, reaching a value of about $0.05 \text{ cm}^{-3}/\text{km}$ (De Keyser et al., 2007). Its direction points there toward Earth, as expected for a regular plasmasphere shape, locally axi-symmetric.

Various types of natural emissions are observed during this plasmasphere crossing. We now briefly describe emissions related to the electron gyrofrequency f_{ce} (about 9.4 kHz at equator) and observed below the plasma frequency f_p . The first type of such waves is intense emissions observed near 08:05 UT, confined within a few degrees of magnetic latitude. These emissions are observed in a harmonic form at successive frequencies qf_{ce} , respectively, ~ 15 , ~ 26 , ~ 35 kHz and above, between harmonics of f_{ce} , and are thus identified as $(n + 1/2)f_{ce}$ emissions. They are also characterized by a large frequency bandwidth, defined as the full width at half the intensity maximum (FWHM). We will discuss this property further down in this section. The second type of natural emissions below f_p is an emission existing over a larger magnetic latitude interval, Lat_{SM} varying from -15° to 15° . This spectral feature is highlighted in the figure with a yellow arrow. This emission, well defined in frequency, with a narrow bandwidth (< 2 kHz), is observed exactly at $1.1 f_{ce}$. The intensity of this emission is two order smaller than the intensity of the equatorial emissions. They are a common feature on

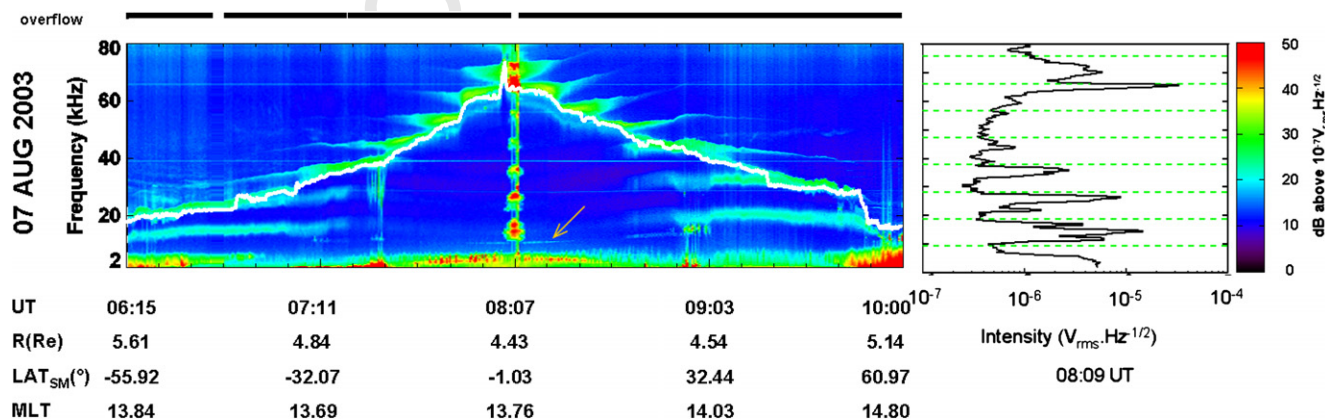


Fig. 1. Natural emissions measured on August 7th, 2003, by WHISPER on CLUSTER C4. (Left panel) Frequency–time spectrogram of the measured electric field. The white solid line follows the estimated plasma frequency. The arrow indicates emission at $1.1 f_{ce}$. Coordinates of the satellite are given in Solar Magnetic (SM) coordinate system. The top bar indicates data status: white for data gaps, black for nominal conditions, green for data affected by saturation. (Right panel) Detailed spectrum at 08:09 UT, frequency band 0–80 kHz in ordinate. Dotted green lines indicate the electron gyrofrequency f_{ce} and its harmonics.

WHISPER spectrograms at perigee and can be associated or not with equatorial emissions. Other emissions displaying spectral feature related to f_{ce} , are observed both in the southern and in the northern hemisphere. Very faint (almost at noise level) in the equatorial region ($f_p > 30$ kHz and $|\text{Lat}_{\text{SM}}| < 30^\circ$), they reach significant levels further out the plasmasphere body, for long-time intervals (~ 1 h). The last type of emissions we can mention is observed below f_{ce} during several hours (from 07:00 to 10:00 UT). They are identified as chorus (Parrot et al., 2003).

In this work, we focus on the electrostatic emissions at $(n + 1/2)f_{ce}$ appearing within a few degrees of magnetic latitude. The right panel of Fig. 1 displays the frequency spectrum measured at 08:09 UT, just before the spacecraft crossed geomagnetic equator. We can clearly observe in this spectrum emissions, observed between two electron gyroharmonic frequencies, represented by green dotted lines on the figure. Four harmonic bands are observed, their intensity decreasing with the order of harmonic, from $1.7 \cdot 10^{-5} V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}$ for the first harmonic band to $8 \cdot 10^{-7} V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}$ for the fourth one. Note that the emission at the upper hybrid frequency f_{uh} (~ 65 kHz), is more intense ($> 5 \cdot 10^{-5} V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}$) than the $(n + 1/2)f_{ce}$ bands.

Some intense emissions can cause a saturation (overflow) of the instrument, leading to spurious frequency replicas. This is the case here around 08:08 UT as it is indicated in the figure by the green colour on the top bar of the spectrogram. However, despite the presence of these replicas, we are able to characterize properly the natural emissions at $(n + 1/2)f_{ce}$, because not all the spectra are affected.

The measured raw signal, S , is expressed in Fig. 1 in unity of $V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}$, as is generally the case with WHISPER data. This quantity represents the electric field spectral density integrated along the effective length of the antenna, L_{eff} . Since the L_{eff} value depends significantly on the plasma regime considered and on the frequency range analysed (see Béghin et al., 2005, for a quantitative study of the behaviour of CLUSTER antennas), it is convenient to introduce this value only when necessary, i.e. when we need actual electric field values. This is the case here. In order to discuss possible contribution of $(n + 1/2)f_{ce}$ emissions to pitch angle diffusion, we must convert the WHISPER spectral density (in $V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}$) to the amplitude (in $V_{\text{rms}} \text{m}^{-1}$, or $V \text{m}^{-1}$ in short) of a sine electric field of equivalent energy. This allows a comparison with the threshold level, $E_0 \sim 1$ to 2 mV m^{-1} , reported by several authors to cause pitch angle diffusion (see for example Belmont et al., 1983). The conversion reads:

$$E_{\text{sin e}} (V \text{m}^{-1}) = \frac{\sqrt{\Delta F} (\text{Hz})}{L_{\text{eff}} (\text{m})} S (V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}) \quad (1)$$

where ΔF is the useful frequency bandwidth.

L_{eff} is sometimes considered, for simplicity, to be equal to the actual tip to tip length of the antenna, 88 m in the case of CLUSTER. This would lead to an underestimation

of the electric field value. We shall here adopt a more reasonable estimation, $L_{\text{eff}} = 53$ m, valid for plasmas of $\lambda \sim 5$ m Debye length, typical values in the outer plasmasphere (Décreau et al., 1982), in accordance with Fig. 6 of Béghin et al. (2005). Another factor of importance is the spin modulation coefficient, which affects the signal amplitude according to the antenna angle with magnetic field, since the $(n + 1/2)f_{ce}$ electric field is expected to be preferentially directed perpendicularly to magnetic field. As, near equator, the magnetic field makes a small angle with spin axis, we can ignore this effect in a first approximation. This could lead in any event to an underestimation of the electric field amplitude. Finally, we must evaluate the useful bandwidth ΔF . In the frame of theories involving monochromatic waves, we shall simply use the instrumental equivalent bandwidth, i.e. the $\Delta F = 556$ Hz value corresponding, in standard operation modes (324 Hz frequency resolution), to the conversion of a pure sine wave, leading finally to:

$$E_{\text{sin e}} (V \text{m}^{-1}) = 0.44 S (V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}) \quad (2)$$

Eq. (2) might underestimate the meaningful amplitude estimation, since the observed bandwidth is generally higher, as described below.

The electrostatic emissions at $(n + 1/2)f_{ce}$ are observed between 08:04 UT and 08:10 UT with a total latitude extension of 4° in the modelled Lat_{SM} value (from -3° to $+1^\circ$). The study of the overall frequency bandwidth of these emissions shows a maximum of the frequency bandwidth near geomagnetic equator, up to 8 kHz, with a higher value of the bandwidth for the first harmonic (the respective ratio of the bandwidth normalized to f_{ce} is $\sim 80\%$ for the first harmonic, 50% for the second one and 30% for the third one) in accordance with observations reported in previous works (Kennel and Ashour-Abdalla, 1982). Maximum values of intensity ($2.7 \times 10^{-5} V_{\text{rms}} \text{Hz}^{-1/2}$) and bandwidth are reached at 08:07 UT at modelled latitude $\text{Lat}_{\text{SM}} = -1^\circ$, which we believe is the actual geomagnetic equator.

We can also point out that the good frequency resolution of the WHISPER instrument (324 Hz in standard mode) allows the detection of interesting fine structures that are showing up in the detailed successive spectra recorded. For this event, if we focus on the $3/2 f_{ce}$ band: starting at 08:04 UT, it displays a double peak (f_{peak}/f_{ce} equal, respectively, to 1.5 and 1.7), which evolves into a triple peak (f_{peak}/f_{ce} equal, respectively, to 1.25, 1.52 and 1.76) at 08:09 UT, as shown in right panel of Fig. 1, at a less than 3° magnetic latitudinal distance. This evolution in the detailed structure of the $3/2$ band is not explained by a change in the magnitude of the magnetic field which is constant (within less than 0.5%) between the two observations. Alternatively, if we focus on the evolution of the spectral pattern with the order of harmonic band considered, we can point out that the frequency of the maxima of intensity of each harmonic is shifted from the exact half of the bandwidth. This frequency increases from about $3/2 f_{ce}$ for the first harmonic band, to higher values in frequency for the

higher harmonics ($5/2 f_{ce}$, ...) up to $4.8 f_{ce}$ for the fourth harmonic band. Various positions in frequency could be explained by the different instability mechanisms leading to the apparition of these emissions, like a loss cone one for emissions lower than the exact half and a thermal anisotropy for the emissions higher than the exact half (Kennel and Ashour-Abdalla, 1982). Moreover, as shown by Horne et al. (2003), $(n + 1/2)f_{ce}$ waves are very sensible to propagation effects, which could explain some of the observed evolutions.

In summary, we show on this event study that $(n + 1/2)f_{ce}$ waves are strongly collimated near the geomagnetic equator. The $\pm 2^\circ$ latitudinal range is representative of all our observations. Another notable experimental result is the observation of fine structures inside the harmonic bands, with a complex evolution with respect to magnetic latitude. The evolution noted here is specific to the analysed event: other events show different behaviours, but most of them display fine frequency structures, which have not been, at this time, fully described (see Koons and Fen-nell, 1984; Paranicas et al., 1992, for examples of observed fine structures). It is outside the scope of this paper to discuss any interpretation, but we wish to underline the fact that a significant wave activity is present over a large part of the $3/2 f_{ce}$ harmonic band, as well as, in many cases, in the higher harmonic bands, as we will see in the next section.

3. Statistical study

In this part, we present a statistical study of $(n + 1/2)f_{ce}$ emissions. As mentioned before, we use WHISPER data collected by the CLUSTER spacecraft near perigee, over the years 2002–2004. At perigee (located around $4 R_E$ geo-centric distance), we can monitor each crossing of the geomagnetic equator and check the presence of the emissions we are interested in. The 3 years duration of the data set analysed, compared to the orbital period duration (57 h), leads to a significant number of perigee passes (461 events), covering all MLT sectors.

During years 2002–2004, the average size of CLUSTER constellation varies from 100 to 6000 km. Because the constellation is elongated along the polar orbit at perigee, its projection onto the geomagnetic equator plane has a significantly smaller size: the maximal separation distances at equator crossings is always less than $0.5 R_E$. Moreover, the crossings occur within 1 h at most. This delay is shorter than characteristic durations involved in global dynamics of the plasmasphere, i.e. in generation and corotation of a large plasmopause structure: such durations are typically higher than 3 h and less than 3 days (see for instance Pierrard and Cabrera, 2005). We can see that the four spacecraft will generally observe no major changes from the first to the last crossings at the same perigee pass, since they are grouped together in space and time. In contrast, changes in the plasmasphere between two successive perigee passes are expected. For our statistical study, we have chosen to

treat data from a single satellite over a long period rather than to analyse observations from all spacecraft over a shorter period. We have selected the satellite CLUSTER 3 (C3). In this way, a database of 461 perigee events, which can be considered as statistically independent, has been constructed. All MLT sectors are equally covered.

3.1. Analysis of perigee data

The detection and characterization of $(n + 1/2)f_{ce}$ emissions near perigee have been performed by combining manual and automatic processing steps. In a first step, we have examined dynamic spectrograms near perigee, and have identified and listed the approximate times of geomagnetic equator crossings as indicated by a standard model of magnetic field. Our visual inspection allows distinguishing and listing perigee passes with or without $(n + 1/2)f_{ce}$ waves. It has been useful in particular to examine detailed spectrograms over passes when WHISPER saturation level is reached, in order to distinguish actual $(n + 1/2)f_{ce}$ events from frequency replica of the saturating signal. As we have seen in Section 2, this is possible as, generally, not all individual spectra are affected by saturation during perturbed perigee events, thus these events are taken into account in our statistics. Lastly, we note the number of harmonic bands displaying $(n + 1/2)f_{ce}$ emissions.

The series of approximate times at equator crossings, t_{in} , have been used as an input for a second processing step, which performs an automatic analysis of each event with waves. We make use of a tool, which localizes, in each individual WHISPER frequency spectrum, the most significant maxima of signal intensity (Rauch et al., 2006). Frequency peaks can then be followed over a given time and frequency interval. We have chosen to deal with a domain of 10 min time duration, centered at t_{in} , and of $0.8 f_{ce}$ frequency width, centered at $1.5 f_{ce}$. Inside this time–frequency domain, the tool identifies and follows in time the peak of highest intensity. The gyrofrequency f_{ce} is derived for each spectrum from the magnetic field intensity measured by the FGM instrument (Balogh et al., 2001). The complete operation is repeated over higher electron gyroharmonic bands. The lowest frequency band, around $1.5 f_{ce}$, is always present whenever higher harmonics are. A detailed analysis is conducted in this specific frequency band, whereby four quantities are calculated: the frequency and peak intensity of the main peak, its frequency bandwidth and its energy integrated over the frequency bandwidth. Their time variations are monitored over the 10-min interval. In practice, the peak is visible (i.e. above noise level) not over the whole duration of the time interval, but only over a part of it. We note the time and latitude at the two extrema (one in each hemisphere) between which the peak is visible. Finally, the time when the electric field amplitude reaches its maximal value determines the exact reference time of the event, t_{ref} .

Observations at perigee are sorted out according to three event groups.

- No data: WHISPER is not operational at the time of perigee crossing; 74 events (16% of the orbits) belong to this category.
- No $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions present near geomagnetic equator; 123 events (27% of the orbits) belong to this category.
- $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions present near geomagnetic equator; 264 events (57%) belong to this category. We can sort these equatorial events further, according to two subclasses, mono-harmonic ones (i. e. only $3/2 f_{ce}$ waves) and multi-harmonic ones. Their relative proportion is, respectively, 18% and 82%.

We can note from this first analysis that the $(n + 1/2) f_{ce}$ waves are a common phenomenon in the equatorial region around the perigee altitude of CLUSTER, with a proportion of 68% of wave events among all crossings with data.

3.2. Latitudinal dependence

The analysis described above can be directly used to study the latitudinal dependence of the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions. First, we examine latitudes at the times of reference, t_{ref} . All 264 events of our database indicate a latitude, obtained with the Tsyanenko and Stern (1996) model, close to 0° (0.2° in average, with a standard deviation of 1.5°). Second, we examine the latitudinal extension of the events, evaluated from the first and last detection of the main peak (belonging to the lowest harmonic band). Those detections are, for all events, located inside the $[-3^\circ, +4^\circ]$ latitude interval. Third, we examine how the frequency bandwidth Δf at half magnitude (FWHM) of the main peak of lowest harmonic band varies with latitude. This quantity reaches a maximum value near geomagnetic equator, and behaves similarly in higher harmonic bands: its largest value occurs at the same latitude than in the lowest band. In addition, the study of the ratios $\Delta f/f_{ce}$ indicates a typical value of 70% for the lowest harmonic band, and decreasing ratio values for higher harmonic bands. Lastly, we analyse the frequency position of the main peak emission, normalized to the local gyrofrequency value, f_{ce} . This parameter varies significantly with magnetic latitude, crudely symmetrically with respect to the true equator position (at maximal intensity). This behaviour could result from propagation in a spatially non homogenous medium.

In any case, the geomagnetic equator position appears to be of great importance in the detailed behavior of $(n + 1/2) f_{ce}$ waves.

3.3. Magnetic local time dependence

3.3.1. Wave occurrence versus MLT

We concentrate now on the C3 perigee passes with WHISPER data (387 passes), analysed as described above. The occurrence of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions as a function of the MLT sector is displayed in Fig. 2a. Twelve cells of dimension $1 R_E \times 2 h$ MLT are drawn in polar coordinates. In each cell,

we show in colour code the number of passes with equatorial $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions, divided by the number of C3 crossings (with data available). The cells are centered at $4 R_E$, which is approximately the geocentric distance of C3 at the time of geomagnetic equator crossing. Precise positions in R-MLT at equator crossings are indicated by the white crosses and black circles corresponding respectively to crossings with or without waves. We note that the occurrence of the waves is significant, 40% or more, in all MLT sectors. CLUSTER's orbit configuration in years 2002–2004 appears thus to be suitable for a statistical study of those waves. Clearly, $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions are observed with a higher probability in the dawn sector (03–09 MLT) than in average, and, in contrast, with a lower probability in the dusk sector (16–18 MLT). This result agrees with previous studies (Roe-der and Koons, 1989; Christiansen et al., 1978). Moreover, such a dawn-dusk asymmetry looks roughly like that of the equatorial plasmopause, which leads us to study further a possible relationship between both phenomena. More precisely: are $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions co-located with a plasmopause layer? How closely? To evaluate this, we need to estimate the distance between C3 and the plasmopause layer. After discussing the above results in view of a global empirical modelled plasmopause, we will use WHISPER proper measurements of equatorial densities, indicating where the spacecraft crosses the plasmasphere.

3.3.2. Evaluation of CLUSTER distance to plasmopause

The comparison of the position of C3 at perigee with Carpenter's empirical model of the plasmopause position (Carpenter, 1970), represented in the bottom right of Fig. 2a, shows that at the radial distance of $4 R_E$, the spacecraft is close to the plasmopause on all MLT sectors except for the bulge (18–23 MLT). In this empirical model (based on ground based noise whistler signatures), the plasmopause is identified as a sharp knee in the density radial profile, the density jump going typically from 20 to 200 cm^{-3} . A significant part ($20 - 80 \text{ cm}^{-3}$) of this density jump corresponds to a plasma frequency band (40–80 kHz) within the WHISPER frequency range. Each plasmasphere crossing observed by WHISPER (near CLUSTER perigee) can be translated in a density profile versus radial distances above $4 R_E$, and thus can be related to a modelled plasmopause knee. Some of those profiles indicate that the plasmasphere crossing includes the plasmopause knee, others that the knee is located below CLUSTER perigee. We can hence qualify the empirical position of the plasmopause in each pass by the value of the equatorial plasma frequency f_{p-eq} .

Values of f_{p-eq} are obtained by visual inspection of WHISPER perigee spectrograms. This frequency is evaluated, near geomagnetic equator crossing, with a precision of $\pm 5 \text{ kHz}$. One of the seven values (going from 30 to $>80 \text{ kHz}$) is assigned: 30 kHz referring to actual f_{p-eq} values between 25 and 35 kHz, 40 kHz to f_{p-eq} values between 35 and 45 kHz and so on, 80 kHz to f_{p-eq} values between 75 and 80 kHz. Finally, the value $>80 \text{ kHz}$ refers to cases of equatorial plasma frequencies above WHISPER limit.

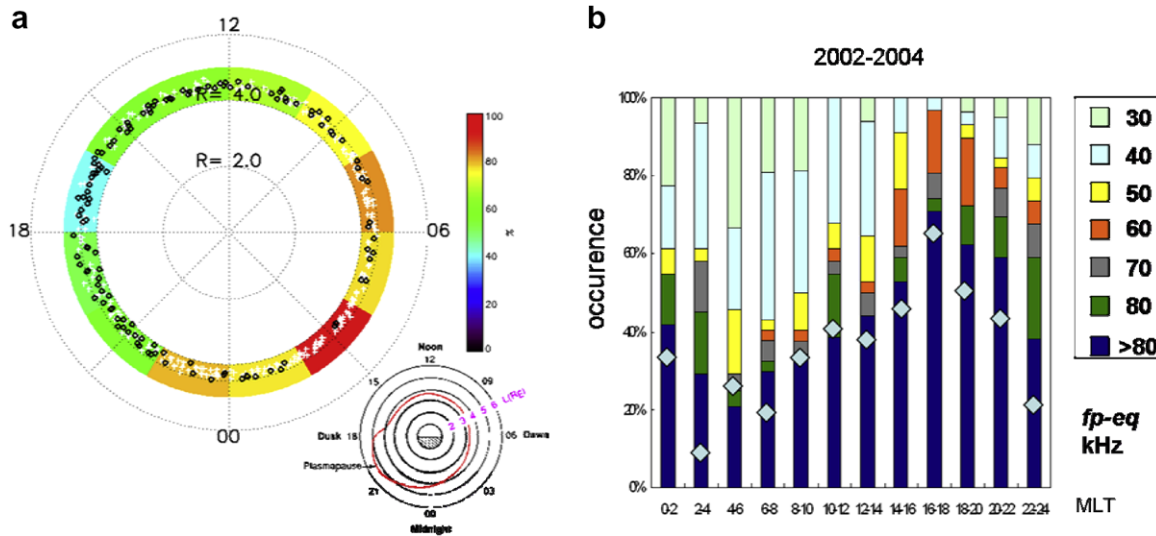


Fig. 2. Magnetic local time dependence. Panel (a) Occurrence of the $(n + 1/2) f_{ce}$ equatorial emissions in an R-MLT plane. Positions of geomagnetic equator crossings with or without observation of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions are represented, respectively, by white crosses and black circles. A modelled plasmapause position in the geomagnetic equatorial plane is presented in the bottom right corner (from Carpenter, 1970). Panel (b) Relative occurrence of equatorial plasma frequency values measured by WHISPER at geomagnetic equator crossings, in the different MLT sectors. Diamonds indicate the percentage of absence of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions at crossings.

To identify the plasmapause knee, we choose the critical values of $f_{p-eq} = 60$ kHz, equivalent to a density $N_e \sim 45 \text{ cm}^{-3}$, a value located in the middle part of the plasmapause density jump.

The variations of f_{p-eq} estimated for the C3 plasmasphere crossings are represented on Fig. 2b as a function of the MLT sector. The relative number of cases in each class is represented by the length of colour bar assigned to each class. Those values cover a large range at all MLT sectors, the distribution being clearly MLT dependant. The occurrence of high plasmasphere densities varies according to the different MLT sector in a way directly related to the morphology of the average plasmapause shown, with a typical dawn-dusk asymmetry. When C3 is located beyond the modelled plasmapause (dawn and morning MLT sectors), f_{p-eq} is then, with a high probability, lower than 60 kHz. When CLUSTER is located below the modelled plasmapause (bulge to midnight MLT sector), f_{p-eq} is then, with a high probability, higher than 60 kHz.

We will now use the parameter f_{p-eq} as a proxy of the distance to the plasmapause and we will sort and discuss the characteristics of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions (existence, intensity, number of harmonics) according to this parameter.

3.3.3. Wave occurrence versus distance to the plasmapause

We have recognized that both MLT and distance to the plasmapause might play a role on the emission of $(n + 1/2) f_{ce}$ waves. We compare now the MLT dependence of, first, the occurrence of the waves and, second, the distribution of the proxy f_{p-eq} . The proportion of equatorial crossings without emissions is shown in Fig. 2b for each MLT sector (light blue diamond). The MLT variation of this value follows quite well the proportion of $f_{p-eq} > 80$ kHz. This is not by pure chance. Actually, all non occurrence cases are observed under $f_{p-eq} > 80$ kHz conditions (or $f_{p-eq} = 80$ kHz, for a small number of them). We can also notice this feature in Table 1, where all values of low plasma frequency ($f_{p-eq} \leq 60$ kHz) correspond to crossings

Table 1

Occurrences of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions according to local time sectors established from 387 perigee passes with data

	Occurrence			$f_{p-eq} \leq 60$ khz				Intensity har1 $\geq 10^{-4} V_{rms}$ Hz $^{-1/2}$		
	EQ (%)	3/2 (%)	Multi (%)	tot (%)	EQ (%)	3/2 (%)	Multi (%)	EQ (%)	3/2 (%)	Multi (%)
Dawn 03-09 MLT	81	7	74	60	60	0	60	70	0	70
Noon 09-15 MLT	64	9	55	48	48	2	46	51	2	49
Dusk 15-21 MLT	48	15	33	24	24	5	19	41	5	36
Midnight 21-03 MLT	77	19	58	38	38	0	38	59	0	59

Column “occurrence”: occurrence of passes with events “EQ”, “3/2” and “multi” refer respectively to all $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions, mono-harmonic emissions and multi-harmonic emissions.

Column “ $f_{p-eq} \leq 60$ kHz”: occurrences of all passes under moderate equatorial plasma frequency conditions listed in the sub-column “tot” are compared to occurrences of passes combining moderate equatorial plasma frequency and observations of events of the tree types described above.

Column “intensity”: occurrences of events with intense ($> 10^{-4} V_{rms} \text{ Hz}^{-1/2}$) signal level in the first harmonic band listed according to the tree types of emissions described above.

with observations of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions in the different MLT sectors. Consequently, it seems that high equatorial densities, meaning that CLUSTER spacecraft is inward of the plasmopause layer, are unfavorable to $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions. We can also observe that the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions are systematically observed for a large range of values of the equatorial plasma frequency, whatever MLT sector considered. More precisely, in the dawn sector we see that the high occurrence of the observations correspond to low values of the equatorial plasma frequency (CLUSTER outward the plasmopause layer) on most of the cases. In the bulge sector, the low occurrence of observations can be attributed to the high values of f_{p-eq} prevailing in this region. Conversely, some cases with wave occurrence are observed under high plasma frequency conditions, i.e. inward of the plasmopause layer, especially in the night sector, as if the shielding of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions by high densities would be less efficient in the night sector. This behavior could be explained by the higher occurrence of small and local density structures in this part of the outer plasmasphere (Darrouzet et al., 2004). An event study has indeed shown that density depletions actually favor this type of emissions. Another possible explanation is that this MLT sector is crudely co-located with the plasmasheet injection boundary of electrons (Horwitz et al., 1986), possibly associated to $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions.

3.4. Spectral properties versus equatorial densities

The number of harmonics observed by WHISPER for the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions varies from one to nine, with a higher proportion of multi-harmonic observations (82% of the total number of equatorial observations). Monotonic (single harmonic) emissions are observed with different proportions according to the MLT sector considered. The highest ratio of monotonic observations versus multi-harmonic observations is found in the dusk sector and the lowest ratio is found in the dawn sector (see Table 1).

A detailed statistical analysis of the monotonic emission events indicates that their presence is regulated by the radial distance to plasmopause (defined by the f_{p-eq} parameter proxy). All observations fit with the following scenario: an observer, moving from the inner plasmasphere toward the outer region, would first find no equatorial emissions (in the inner plasmopause layer, i.e. at $f_{p-eq} \geq 80$ kHz), then monotonic ones (f_{p-eq} at intermediate values) then multi-harmonic ones (f_{p-eq} at low values). Indeed, statistically, higher is the value of f_{p-eq} , lower is the value of the number of harmonics observed. As shown in Table 1, the proportion of $f_{p-eq} \leq 60$ kHz is no more than 5% for mono-harmonic emissions, whereas it is 60% for multi-harmonic ones. We can also notice that all plasmasphere crossings at values of $f_{p-eq} \leq 60$ kHz are associated with observations of equatorial events, in most cases of multi-harmonic emissions.

Furthermore, using event studies, El-Lemdani Mazouz et al. (2006) have compared observations from the four

spacecraft located at small geocentric distance from each other. They show that radial distance to plasmopause is indeed a strict regulator of the number of harmonic bands displaying $(n + 1/2) f_{ce}$ waves: higher is the radial distance (lower is the f_{p-eq} value), higher is the upper n value of the series, within the limit $(n + 1/2) f_{ce} < f_{p-eq}$. This finding can be interpreted by considering that the ratio of warm to cold electron plasma populations is an important factor of the generation mechanism. This ratio increases with radial distance, as the ionospheric plasma source is progressively supplemented by plasmasheet source, thus favoring the apparition of a higher number of harmonics.

3.5. Intensity analysis

One of the drivers for studying the intensity of the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions is the question mentioned in the introduction section, related to the origin of diffuse auroras: are emissions sufficiently intense to cause particle precipitations? In order to examine the situation from CLUSTER point of view, we have performed a statistical analysis of the measured wave intensity level in the first harmonic band (generally the most intense one).

To this end, we detect automatically, for each event, the time and frequency of the main peak of intensity in the first harmonic band, and record its intensity level. The normalized histogram shown in Fig. 3a displays the distribution of intensities characterizing the events, as a function of the MLT sector of observation. We divide the intensity levels in five ranges, going from 1.10^{-7} to $1.10^{-1} V_{rms} Hz^{-1/2}$. The proportion of events with intensity higher than $10^{-4} V_{rms} Hz^{-1/2}$ is around 57% of the total observed equatorial events. The most intense emissions are present in the dawn sector, where the maximum amount of events with high intensity levels ($I \geq 10^{-4} V_{rms} Hz^{-1/2}$) is about 70% of the total number of events detected in this sector. The less intense emissions are present in the dusk sector, with a relative number of events with $I \geq 10^{-4} V_{rms} Hz^{-1/2}$ amounting to about 41%. We can note that a high proportion of intense emissions corresponds to a high occurrence of the events (shown in Fig. 2a).

We can relate the intensity levels of events with the equatorial plasma frequency value, by analyzing in parallel Figs. 2b and 3a. The proportion of events with $I \geq 10^{-4} V_{rms} Hz^{-1/2}$ increases with the proportion of $f_{p-eq} \leq 60$ kHz in all MLT sectors. Globally, the scatter plot of intensity values versus the f_{p-eq} parameter, displayed in Fig. 3b, indicates a clear anti-correlation between the two quantities of interest, as if the intensity would increase with the geocentric distance of observation (which globally increases as f_{p-eq} decreases). Furthermore, case events analysis of multi-point measurements at large spacecraft separation indicates, systematically, the same behavior (see El-Lemdani Mazouz et al., 2006): in a given MLT sector and under given geophysical conditions, the intensity of equatorial ECH emissions increases with geocentric distance. In paral-

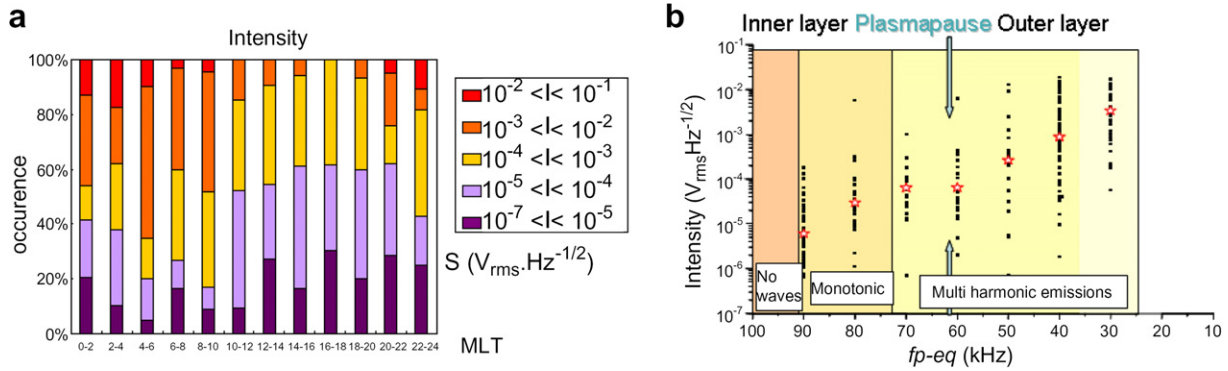


Fig. 3. Analysis of wave intensity. Panel (a) MLT distribution of wave intensities (expressed as the spectral density of a potential difference) at peak of equatorial $3/2 f_{ce}$ emissions. Panel (b) Distribution of electric field intensities in the different classes of equatorial plasma frequency. Red stars indicate median values. Three different background colours underline three plasma frequency domains in which typical spectral behaviors are encountered, as labelled at the bottom of the figure.

lel, the number of harmonic bands with emissions increases.

Fig. 3b shows a large dispersion in intensity values obtained for each assigned value of the equatorial plasma frequency. This is likely due to different behaviors according to the MLT sector concerned. Compared occurrences of large intensities and low equatorial plasma frequencies versus MLT sectors are summarized in Table 1. When we compare dawn and dusk MLT sectors, or dawn and noon MLT sectors, the occurrence of large intensities increases with the occurrence of low plasma frequencies (as in the general behavior shown in Fig. 3b). An exception appears when we compare noon and midnight sectors, as the occurrence of intensities at $I \geq 10^{-4} V_{rms} Hz^{-1/2}$ increases from 51% (noon sector) to 59% (midnight sector), whereas the occurrence of $f_{p-eq} \leq 60$ kHz decreases from 48% to 38%. Lastly, Table 1 indicates that the first harmonic band is more intense for multi-harmonic observations than for monotonic ones, the proportion of intense monotonic emissions being no more than 2% of the total emissions of high intensity ($I \geq 10^{-4} V_{rms} Hz^{-1/2}$). The highest occurrence of intense monotonic observations is observed in the dusk sector.

Thus, we can say that the proximity to the plasmapause position plays a role in governing the intensity of the waves, with an exception in the midnight sector. Such a behavior could be due to a comparatively higher density ratio of warm to cold populations in the sector populated by the plasmasheet source. The WHISPER sounder is able to estimate this ratio (Trotignon et al., 2003), but a statistical study of this quantity as a function of MLT sector and equatorial density is yet to be done.

Finally, we compare intensities of $3/2 f_{ce}$ emissions estimated from the GEOS perspective (Belmont et al., 1983) with intensities obtained from the CLUSTER perspective. The estimation of reference for GEOS is given in Fig. 2 of Belmont et al. (1983), i.e. “the typical wave amplitude of $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ was exceeded during 15% of time”. The latter figure is obtained at $L = 6.6$, a magnetic latitude of 0° , in the night side MLT sector (22–6), assuming a 1 kHz wave

bandwidth. The conversion indicated in Eq. (2) leads to an intensity expressed in WHISPER units of $I = 2.25 \cdot 10^{-3} V_{rms} Hz^{-1/2}$ being equivalent to $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$, considering in this case a ~ 0.5 kHz bandwidth, a figure corresponding to monochromatic waves. Taking account of the difference in geocentric distances (the minimum wave amplitude goes as $L^{-1/2}$), the minimum intensity of reference is finally $\sim 3 \cdot 10^{-3} V_{rms} Hz^{-1/2}$, a threshold exceeded in about 32% of the night side observed events. This result indicates that the intense $3/2 f_{ce}$ ($I \geq 3 \cdot 10^{-3} V_{rms} Hz^{-1/2}$) emissions are observed with higher proportions during CLUSTER perigee passes in the night side sector comparing to GEOS and SCATHA statistical studies. This proportion is still insufficient to explain the scattering of hot electrons, in the frame of theories implying monochromatic waves, where higher proportions of intense emissions are required (Lyons, 1974).

However, the large spectral width of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions observed in practice (~ 5 kHz) would increase this proportion up to more than 50% of the night side events indicating that they could indeed play a role in the generation of diffuse auroras.

3.6. Geomagnetic activity influence

In order to study the correlation between the geomagnetic activity and the presence of the equatorial emissions, we analyse the D_{st} index, characterizing the intensity of the ring current, associated to observations. Values of D_{st} are followed in reverse chronology between the time of geomagnetic equator crossing up to 24 h before. The reason behind this proceeding is the following: the plasmasphere response to a geomagnetic disturbance is quasi instantaneous in the night sector, but happens with several hours delay in the dayside, since corotation has to propagate the deformation from the night to noon sector (Décréau et al., 1982; Pierrard and Cabrera, 2005). A delay of 24 h is thus a reasonable time interval to follow up variations of D_{st} in correlation with observations. We define four different classes of activity, each referring to a given D_{st} range,

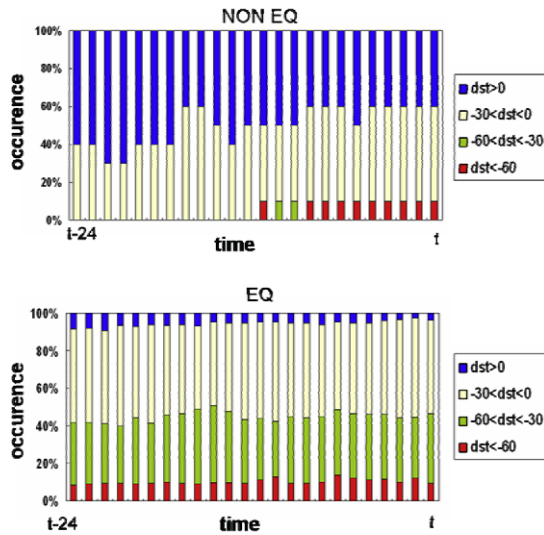


Fig. 4. Role of geomagnetic activity. Time evolution of D_{st} index associated with the absence (top) or presence (bottom) of waves at $(n + 1/2) f_{ce}$.

The value of the plasma frequency, f_{p-eq} , measured at geo-
magnetic equator crossings indicates if the plasmopause
boundary is located inward ($f_{p-eq} > 60$ kHz) or outward
($f_{p-eq} \leq 60$ kHz) of the crossing position, and how deep
inside or far outside of the plasmopause the satellites are.
Statistically, it yields a qualitative estimation of the dis-
tance between the observation and the plasmopause
boundary. The CLUSTER orbit gives a good MLT sam-
pling and a clear localization of the geomagnetic equator,
in contrast with previous studies, affected by gaps in the
MLT sector coverage or in the latitude coverage. A 3 years
long observational period has permitted to conduct a
meaningful statistical analysis of the properties of $(n + 1/2) f_{ce}$
emissions in function of magnetic latitude, MLT sec-
tor and, for the first time, of qualitative distance to the
plasmopause boundary. The main results obtained from
this study can be listed as follows:

- (1) WHISPER instrument detects $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions on all CLUSTER geomagnetic equator crossings, whatever MLT sector considered, under the condition that the crossing occurs in the outer plasmasphere region. Quantitatively, a proportion of 68% of all perigee passes is associated with $(n + 1/2) f_{ce}$ events, the condition $f_{p-eq} \leq 60$ kHz insuring that emissions are present. Such a phenomenon seems thus to be a permanent feature of the outer plasmasphere region, not restricted to any given MLT sector.
- (2) The latitudinal extension of the phenomenon, evaluated from measurements of the main emission, i.e. near $3/2 f_{ce}$, does not vary much from event to event. This extension, defined by the southern and northern limits of a measurable emission intensity level (at or above a threshold of $2 \cdot 10^{-7} V_{rms} Hz^{-1/2}$) stays within the $[-3^\circ \text{ to } 4^\circ]$ magnetic latitude interval.
- (3) The number of electron cyclotron harmonic bands where $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions are present is governed by the way CLUSTER crosses the plasmasphere. It increases with the radial distance of observation, from zero (no emission) deep inside the plasmasphere, up to several bands in the outermost part of the geomagnetic equator surface explored by CLUSTER. The single band case is generally observed just inside of a plasmopause layer. In addition, the intensity of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions is generally decreasing with the order of the band considered.
- (4) The intensity in the main band (near $3/2 f_{ce}$) is increasing with the radial distance of observation (Fig. 3b). Quantitatively, the median value of the intensity increases from $6 \cdot 10^{-6} V_{rms} Hz^{-1/2}$ within the plasmasphere (when f_{p-eq} is above WHISPER's frequency range) by more than two order of magnitudes higher, i.e. up to $3 \cdot 10^{-3} V_{rms} Hz^{-1/2}$ for the class of events corresponding to the outermost region ($f_{p-eq} = 30$ kHz).
- (5) The MLT sector of observation has a significant influence on the occurrence of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions (Fig. 2a), as reported in the past. Quantitatively, the

from quiet geomagnetic activity to disturbed geomagnetic activity. The histograms plotted in Fig. 4 display the relative occurrence of each D_{st} class measured in each of the 24 one hour time intervals preceding the observation. The variation of class occurrences with respect to time delays is shown respectively for equator crossings when we see equatorial emissions, called EQ (bottom panel), and for the crossings without equatorial emissions, called non EQ (top panel). We can note that EQ events are observed during low or moderate geomagnetic conditions ($-60 < D_{st} < 0$), whereas non EQ events are observed during quiet to low activity conditions ($-30 < D_{st}$). The distribution over the different activity classes is stable with time delays, except for the non event cases, which displays a higher proportion of quiet conditions for longest delays. The difference in geomagnetic conditions prevailing respectively for non events and for events can be interpreted as follow. Non events are preceded by a relatively long period of quiet conditions. It is known that under such situation, the plasmasphere expands towards distances significantly larger than CLUSTER geocentric distance at equator. Such situation will drive high equatorial plasma frequencies, screening the waves (Section 3.3.3). On the other hand, our analysis shows that EQ events do not require any specific D_{st} time variation, like for instance a substorm onset, to be triggered. They are observed during a variety of conditions, mostly moderate and likely stable, similar conditions than those which prevail during diffuse auroras.

4. Summary and conclusion

The observations described and analysed here are made with the WHISPER instrument on board the CLUSTER constellation, when the spacecraft cross the magnetic equator at its perigee, i.e. at a geocentric distance of about $4 R_E$.

percentage of geomagnetic equator crossings with wave events observed from CLUSTER varies from 90% in the 02–04 MLT sector down to 35% in the 16–18 MLT sector. Such behaviour is mainly the consequence of the non axi-symmetric shape of the plasmopause boundary, observed here from a fixed radial distance perspective. This affects the MLT distribution of cases placed respectively on each side of the plasmopause, hence, according to (3), the distribution of events and non events. Nevertheless, the MLT sector exerts a proper influence on wave events: almost no wave events are seen in the dayside when f_{p-eq} is above WHISPER's frequency range, whereas a significant number of them is seen under the same conditions in the night sector. Event studies have shown that fine density structures, present in this MLT sector, favour the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions.

- (6) The MLT sector of observation has a significant influence on the intensity of the $3/2 f_{ce}$ emission (Fig. 3a). It is not easy to disentangle both influences, of MLT proper and of distance to plasmopause, on the intensity, since the distribution of the f_{p-eq} parameter values measured during wave events displays a dawn – dusk asymmetry (Fig. 2b) similar to the one displayed by the distribution of the wave intensity values (Fig. 3a). However, some facts indicate that MLT has an influence of its own: (i) the occurrence of intensities at $I \geq 10^{-4} V_{rms} Hz^{-1/2}$ increases from noon to midnight sector, when at the same time the occurrence of $f_{p-eq} \leq 60$ kHz decreases; (ii) the highest occurrence of intense monotonic observations corresponds to the dusk sector.
- (7) Lastly, the influence of geomagnetic activity on the presence of emissions is studied via the variation of the D_{st} index. Results show that the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions are observed during periods of moderate and stable activity, similar to those prevailing during diffuse auroras.

It is important to add that the multipoint capability of the CLUSTER mission has been significant in order to test our statistical results concerning the influence of the distance to plasmopause. Data sets of four spacecraft, crossing the geomagnetic equator surface at short distances from each other, and within a short-time delay, have been compared. Multipoint event studies have been able to confirm the fine role of geocentric distance, revealed for the first time by our study, both on the number of electron cyclotron harmonic bands displaying emissions, and on the wave intensity in the main band.

Concerning the question of the intensity of the emissions leading to pitch angle diffusion, WHISPER measurements show that the highest intensities of the $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions are localized in the dawn sector. Our evaluation of the percentage of CLUSTER wave events exceeding the threshold referred to as necessary to drive a significant pitch angle diffusion is 32%, a factor two higher than what

has been measured from GEOS 2 perspective (Belmont et al., 1983). This fact, combined with the clear increasing of intensity with distance to plasmopause (Fig. 3b) indicates that the 'hottest' region (where the ECH wave intensity is the highest) might be located in between radial distances of CLUSTER perigee and of GEOS 2, and could be indeed sufficient to create diffuse auroras. Further studies, including a larger CLUSTER data set and other data sets (about plasmasheet injections, other geomagnetic activity indices, diffuse aurora observations), could help to conclude.

Regarding to which generation mechanism is the source of $(n + 1/2) f_{ce}$ emissions, the limited study described here provides a few indications: (i) the emissions are not generated in a plasma regime including the single dense cold electron population prevailing in the inner plasmasphere; (ii) the exact position in frequency of the peak in intensity varies within each harmonic band; (iii) it varies in addition with geomagnetic latitude, together with intensity variation; (iv) specific behaviours are observed, according to which event is analysed. A fine analysis of wave features, associated to the context found in each event, and to wave level estimations, could help to shed a new light on this question.

5. Uncited references

Lemaire and Gringauz (1998); Trotignon et al. (2001). Q1

Acknowledgements

We thank the teams at ESOC (Darmstadt, Germany), JSOC (Oxford, UK) and Department of automatic control and systems engineering, University of Sheffield (UK) for their constant support of CLUSTER operations. We want also to thank the FGM team (Imperial College, UK) for providing magnetic field data.

References

- Balogh, A., Carr, C.M., Acuña, M.H., et al. The Cluster magnetic field investigation: overview of in-flight performance and initial results. *Ann. Geophys.* 19, 1207–1217, 2001.
- Béghin, C., Décreau, P.M.E., Pickett, J., et al. Modeling of CLUSTER's electric antennas in space: application to plasma diagnostics. *Radio Sci.* 40, 1–18, 2005.
- Belmont, G., Fontaine, D., Canu, P. Are equatorial electron cyclotron waves responsible for diffusive auroral electron precipitation? *J. Geophys. Res.* 88, 9163–9170, 1983.
- Bernstein, I.B. Waves in a plasma in a magnetic field. *Phys. Rev.* 109, 10–21, 1958.
- Canu, P., Décreau, P.M.E., Trotignon, J.G., et al. Identification of natural plasma emissions observed close to the plasmopause by the Cluster-Whisper relaxation sounder. *Ann. Geophys.* 19, 1697–1709, 2001.
- Carpenter, D.L. Whistler evidence of the dynamic behavior of the duskside bulge in the plasmasphere. *J. Geophys. Res.* 75, 3837–3847, 1970.
- Carpenter, D.L., Lemaire, J. The plasmasphere boundary layer. *Ann. Geophys.* 22, 4291–4298, 2004.
- Christiansen, P.J., Gough, M.P., Martelli, G., et al. GEOS-1 observations of electrostatic waves and their relationship with plasma parameters. *Space Sci. Rev.* 22, 383–400, 1978.

- Darrouzet, F., Décréau, P.M.E., De Keyser, J., et al. Density structures inside the plasmasphere: [cluster](#) observations. *Ann. Geophys.* 22, 2577–2585, 2004.
- Darrouzet, F., De Keyser, J., Décréau, P.M.E., et al. Spatial gradients in the plasmasphere from [cluster](#). *Geophys. Res. Lett.* 33, L08105, 2006.
- De Keyser, J., Darrouzet, F., Dunlop, M.W., et al. Least-square gradient calculation from multi-point observations of scalar and vector fields: methodology and applications with [cluster](#) in the plasmasphere. *Ann. Geophys.* 25, 971–987, 2007.
- Décréau, P.M.E., Béghin, C., Parrot, M. Global characteristics of the cold plasma in the equatorial plasmopause region, as deduced from the GEOS 1 Mutual Impedance Experiment. *J. Geophys. Res.* 87, 695–712, 1982.
- Décréau, P.M.E., Ferreau, P., Krasnoselskikh, V., et al. Whisper, a resonance sounder and wave analyser: performances and perspectives for the CLUSTER mission. *Space Sci. Rev.* 79, 157–193, 1997.
- Décréau, P.M.E., Ferreau, P., Krasnoselskikh, V., et al. Early results from the Whisper instrument on CLUSTER: an overview. *Ann. Geophys.* 19, 1241–1258, 2001.
- El-Lemdani Mazouz, F., Grimald, S., Rauch, J.L., et al. Electrostatic and electromagnetic emissions near the plasmasphere. A case event: 27 May 2003, in: *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium – 5th Anniversary of Cluster in Space*, Noordwijk, The Netherlands, 19–23 September 2005, ESA SP-598, 2006.
- Escoubet, C.P., Russell, C.T., Schmidt, R. The Cluster and Phoenix Missions. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 658 pp., 1997.
- Fontaine, D., Perraut, S., Cornilleau-Wehrin, N., et al. Coordinated observations of electron energy spectra and electrostatic cyclotron waves during diffuse auroras. *Ann. Geophys.* 4, 405–412, 1986.
- Gough, M.P., Christiansen, P.J., Martelli, G., et al. Interaction of electrostatic waves with warm electrons at the geomagnetic equator. *Nature* 279, 515–517, 1979.
- Gough, M.P., Christiansen, P.J., Gershuny, E.J.E.S. Wave morphology near the geostationary orbit. *Adv. Space Res.* 1, 337–343, 1981.
- Gustafsson, G., Boström, R., Holback, B., et al. The electric field and wave experiment for the Cluster mission. *Space Sci. Rev.* 79, 137–156, 1997.
- Horne, R.B., Thorne, R.M., Meredith, N.P., et al. Diffuse auroral electron scattering by electron cyclotron harmonics and whistler mode waves during an isolated substorm. *J. Geophys. Res.* 108, 1290–1302, 2003.
- Horwitz, J.L., Menteer, S., Turnley, J., et al. Plasma boundaries in the inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 91, 8861–8882, 1986.
- Hubbard, R.F., Birmingham, T.J. Electrostatic emissions between electron gyroharmonics in the outer magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 83, 4837–4850, 1978.
- Hubbard, R.F., Birmingham, T.J., Hones Jr., E.W. Magnetospheric electrostatic emissions and cold plasma densities. *J. Geophys. Res.* 84, 5828–5838, 1979.
- Kennel, C.F., Scarf, F.V., Fredricks, R.W., et al. VLF electric field observations in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 75, 6136–6149, 1970.
- Kennel, C.F. and Ashour-Abdalla, M. Electrostatic waves and the strong diffusion of magnetospheric electrons. In *Magnetospheric plasma physics* edited by A. Nishida, 245 pp., D. Reidel, Hingham, Mass., 1982.
- Koons, H.C., Fennell, J.F. Fine structure in electrostatic emission bands between electron gyrofrequency harmonics (from magnetospheric observations). *J. Geophys. Res.* 89, 3015–3018, 1984.
- Krafft, C., Matthieussent, G., Thevenet, P., et al. Simultaneous emissions at $n\omega_c$ and $(n + 1/2)\omega_c$ in space and laboratory plasmas. *J. Geophys. Res.* 97, 14977–14987, 1992.
- Kurth, W.S., Gurnett, D.A. Plasma waves in [planetary](#) magnetospheres. *J. Geophys. Res.* 96, 18977–18991, 1991.
- Lemaire, J.F., Gringauz, K.I. The Earth's [Plasmasphere](#). Cambridge Univ. Press, Cambridge, 372 pp., 1998.
- Lyons, L.R. Electron diffusion driven by magnetospheric electrostatic waves. *J. Geophys. Res.* 79, 575–580, 1974.
- Olsen, R.C., Shawhan, S.D., Gallagher, D.L., et al. Plasma observations at the Earth's magnetic equator. *J. Geophys. Res.* 92, 2385–2407, 1987.
- Paranicas, C., Hughes, W.J., Singer, H.J., et al. Banded electrostatic emissions observed by the CRRES plasma wave experiment. *J. Geophys. Res.* 97, 13889–13898, 1992.
- Parrot, M., Santolik, O., Cornilleau-Wehrin, N., et al. Source location of chorus emissions observed by Cluster. *Ann. Geophys.* 21, 473–480, 2003.
- Pierrard, V., Cabrera, J. Comparison between EUV/IMAGE observations and numerical simulations of the plasmopause formation. *Ann. Geophys.* 23, 2635–2646, 2005.
- Rauch, J.L., Suraud, X., Décréau, P.M.E., et al. Automatic determination of the plasma frequency using image processing on whisper [data](#), in: *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium – 5th Anniversary of Cluster in Space*, Noordwijk, The Netherlands, 19–23 September 2005, ESA SP-598, 2006.
- Roeder, J.L., Koons, H.C. Survey of electron cyclotron waves in the magnetosphere and the diffuse auroral electron precipitation. *J. Geophys. Res.* 94, 2529–2541, 1989.
- Trotignon, J.G., Décréau, P.M.E., Rauch, J.L., et al. How to determine the thermal electron density and the magnetic field strength from the Cluster/Whisper observations around the Earth. *Ann. Geophys.* 19, 1711–1720, 2001.
- Trotignon, J.G., Décréau, P.M.E., Rauch, J.L., et al. The [whisper relaxation sounder onboard cluster: a powerful tool for space plasma diagnosis around the Earth](#). *Cosmic Res.* 41 (4), 369–372, 2003.
- Tsyganenko, N.A., Stern, D.P. Modeling the global field of the large-scale Birkeland current system. *J. Geophys. Res.* 101, 27187–27198, 1996.
- Usui, H., Matsumoto, H., Mukai, T., et al. GEOTAIL observation of electron cyclotron harmonic waves near the dayside magnetopause. *Adv. Space Res.* 24, 99–102, 1999.

II Article 2

F. El-Lemdani Mazouz, S. Grimald, J.L. Rauch, P.M.E. Décréau, G. Bozan, G. Le Rouzic, X. Suraud, X. Vallières, J. G. Trotignon, P. Canu, F. Darrouzet, S. Boardsen

ELECTROSTATIC AND ELECTROMAGNETIC EMISSIONS NEAR THE PLASMASPHERE. A CASE EVENT: 27 MAY 2003

Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium - 5th Anniversary of
Cluster in Space, Noordwijk, The Netherlands, 19 - 23 September 2005, ESA
SP

ELECTROSTATIC AND ELECTROMAGNETIC EMISSIONS NEAR THE PLASMASPHERE. A CASE EVENT: 27 MAY 2003

F. El-Lemdani Mazouz⁽¹⁾, S. Grimald⁽¹⁾, J.L. Rauch⁽¹⁾, P.M.E. Décréau⁽¹⁾, G. Bozan⁽¹⁾, G. Le Rouzic⁽¹⁾,
X. Suraud⁽¹⁾, X. Vallières⁽¹⁾, J. G. Trotignon⁽¹⁾, P. Canu⁽²⁾, F. Darrouzet⁽³⁾, S. Boardsen⁽⁴⁾.

⁽¹⁾ LPCE, 3A avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans, FRANCE

⁽²⁾ CETP, 10 avenue de l'Europe, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE

⁽³⁾ IASB-BIRA, Avenue Circulaire, 3, B- 1180 Brussels, BELGIUM

⁽⁴⁾ NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA

ABSTRACT

We present in this paper a review of electric emissions in the high frequency range (2-80 kHz) by the CLUSTER constellation crossing the outer plasmasphere at its perigee. During the considered event, dated 27th May 2003, the constellation separation was large (5000 km) and the geomagnetic activity high ($K_p \sim 4 - 5$). A large panel of natural emissions are observed, in particular non thermal continuum emissions (NTC) and electrostatic emissions related to f_{ce} , where f_{ce} is the local electron gyrofrequency. Intense NTC emissions visible in the northern hemisphere can be related with simultaneous observations from the IMAGE satellite, informing about large scale beaming properties. We present details about equatorial emissions at $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$ and emissions at $(n+1.1) f_{ce}$ observed at higher latitude. Lastly, intense emissions near the local plasma frequency f_p are observed within large scale density irregularities.

1. INTRODUCTION.

Plasmasphere is a large toroidal region of the inner magnetosphere, composed by dense ($10-1000$ particles/cm³) ion and electron populations of ionospheric origin trapped along magnetic field lines [1]. Several kinds of natural emissions have been observed in the plasmasphere region by previous satellites [2], [3], such as non thermal continuum emission (NTC), bandwidth emissions at $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$, where f_{ce} is the local electron gyrofrequency, plasmaspheric hiss, or chorus.

In this work we are using data of Whisper (Wave of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation) instrument [4] on the CLUSTER mission [5]. WHISPER instrument records the natural waves and yields a diagnostic of the electron density n_e using the sounding technique in the band 2-83 kHz. The electron density is related to the plasma frequency by

$f_p \text{ (kHz)} = 9\sqrt{n_e \text{ (cm}^{-3}\text{)}} \text{ .}$ The four identical satellites (named C1, C2, C3, C4, hereafter) are placed in a tetrahedron layout with a polar orbit (perigee at $4 R_E$, apogee at $19.6 R_E$). The perigee passes provide excellent opportunities to study plasmopause equatorial regions

During the 2003, 27th May, plasmasphere crossing, some of these natural emissions can be observed particularly NTC, Auroral Kilometric Radiation and electrostatic emission at $(n + \frac{1}{2}) f_{ce}$. In this paper a detailed examination of the equatorial emissions is presented. NTC emission is also studied using CLUSTER and conjunction with IMAGE satellite.

2. CASE PRESENTATION

During the 27th may 2003, the four CLUSTER spacecraft cross the plasmasphere between 19 UT and 23 UT. These satellites orbit at 19 hours MLT with a separation of 5000 km. Their orbit configuration is plotted in Fig. 1 in SM coordinates. The magnetic equator is crossed between 20:10 and 21:30 UT

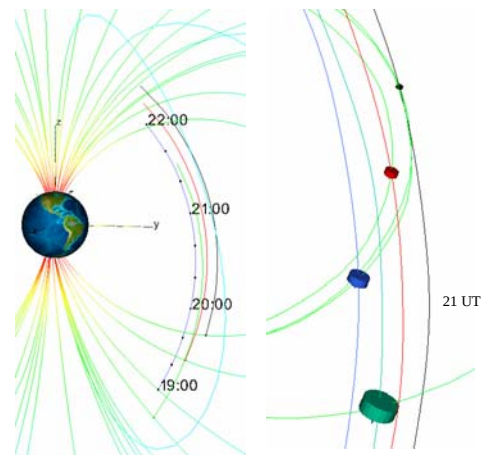


Fig.1 Orbit configuration of the plasmasphere crossing between 19 UT and 23 UT in SM coordinates.

In the spectrograms shown in Fig. 2, we can observe waves recorded by Whisper instrument on the four CLUSTER satellites between 19:00 and 22:10 UT. The orbit parameters are given for C4 in SM coordinates. The plasma frequency is recognized as the narrow banded thermal noise (greenish feature) which rises and falls in frequency position with time, reaching 80 kHz around 20:00 UT for C1. The four time intervals

at highest frequency values correspond to the four plasmasphere crossings. The plasma frequency variations, hence density variations, along the orbits are not smooth, however. Irregularities and large scale features are showing up. The large scale features seen on both sides of the equator, i.e. at $\sim 21:15$ UT and $21:45$ UT for C3 are plumes, or plasmaspheric tails. Attached to the plasmasphere body, each one is encountered twice, as each satellite crosses the corresponding range of L shells first in the southern hemisphere, then in the northern hemisphere. In this particular case, the main plume is placed closer to the plasmasphere body at smaller longitudes (C3 close-by crossings at ~ 18.8 MLT, compared to larger apart C1 crossings at ~ 19.15 MLT), in contrast with typical plume configuration [6].

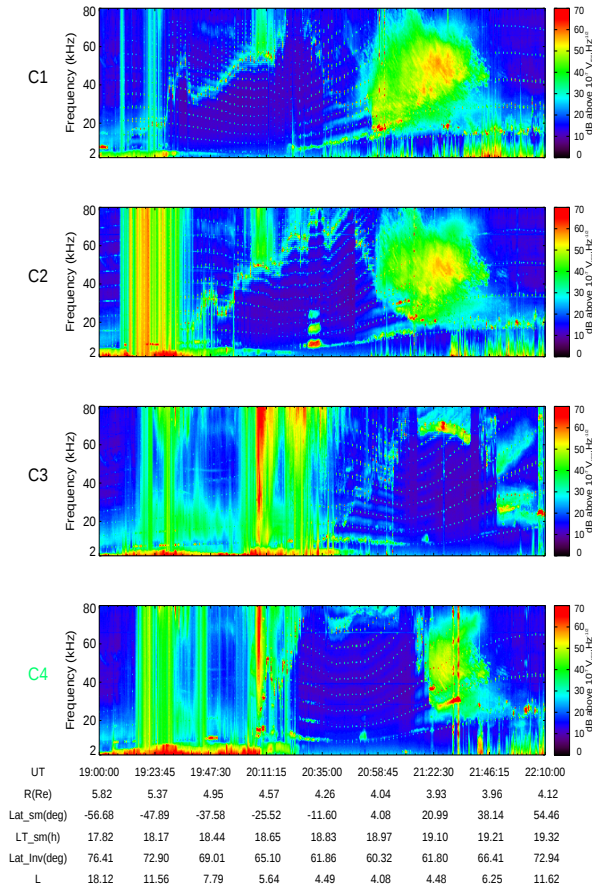


Fig. 2 Dynamic spectrograms of HF electric field produced by WHISPER

Most emissions appear differently according to the observing satellite, which is not a surprise considering their large separation. Indeed, even electromagnetic emissions propagating mainly in free space (Auroral Kilometric Radiation, AKR, and NTC), which reach thus all SC almost simultaneously, will have encountered different plasma regions along the ray paths, eventually blocking part of the spectrum. This is

the case for instance with the intense AKR radiation appearing shortly after 20 UT. AKR emission will not be further described in this study.

The first emissions we can examine are emissions related to f_{ce} . Equatorial ones, positioned in frequency at $(n+1/2) f_{ce}$, appear near the magnetic equator on C2 ($\sim 20:30$ UT), C3 ($21:20$ UT) and C4 ($20:50$ UT). Other emissions related to f_{ce} appear for latitudes up to 30 degrees, both in the southern and the northern hemisphere. Besides, intense emissions are observed near the local plasma frequency (intensity about $10^{-5} V_{rms} m^{-1} Hz^{-1/2}$) for C3 at about $21:22$ UT, i.e. within the density notch placed between the plume and the plasmasphere body.

Another type of emission, is observed by C3 in the same region of space: faint, “narrow band” features at frequency positions along nf_{ce} (see blow up in Fig. 8)

Furthermore, we can clearly survey electromagnetic emissions in an energetic and large form between $20:30$ and $21:46$ UT for C1. Similar emissions appear on C2 and C4 whereas they are blocked on C3, which is travelling inside the outer plasmasphere at this time. We interpret those intense emissions as NTC, owing to the latitude of observation, despite rather unusual spectral characteristics, i.e. narrow band elements, rapidly decreasing with frequency. Satellite C3 crosses an NTC beam shortly after $21:45$ UT, with spectral characteristics more frequently observed on CLUSTER, i.e. two large frequency bands, here at central frequencies increasing with latitude. Those bands are not visible from the three other viewpoints at that time. Details about both types of NTC are presented below.

3. ELECTROSTATIC EMISSIONS RELATED TO f_{ce}

Intense emissions related to the electron gyrofrequency are observed during the plasmasphere crossing. These emissions appear at different magnetic latitude and with different forms. Large emissions near $(n+1/2)f_{ce}$ take place near magnetic equator and narrow bands at $(n+1.1)f_{ce}$ come into view at higher magnetic latitude.

3.1 Equatorial emissions at $(n+1/2) f_{ce}$

The equatorial region of the plasmasphere is a favoured area where wave-particle interaction and wave generation can occur. Near magnetic equator intense emissions at $(n+1/2)f_{ce}$ can take place. These emissions have been observed for the first time by the mission OGO5 [7].

In the 27th may 2003 CLUSTER perigee pass, the $(n+1/2) f_{ce}$ appear on C2, C3, C4 respectively while no emission appears in C1. In fig. 3 we can clearly observe different number of harmonics for the three satellites

with various intensities levels and various time durations.

Three harmonics are observed by C2 between 20:25 and 20:37 UT respectively at $1/2 f_{ce}$, $3/2 f_{ce}$ and $5/2 f_{ce}$, where $f_{ce}=6\text{kHz}$.

One harmonic is observed by C3 between 21:16 and 21:23 UT at $1/2 f_{ce}$, where $f_{ce}=7\text{kHz}$.

One harmonic is observed by C4 between 20:49 and 20:55 UT at $1/2 f_{ce}$, where $f_{ce}=8\text{kHz}$

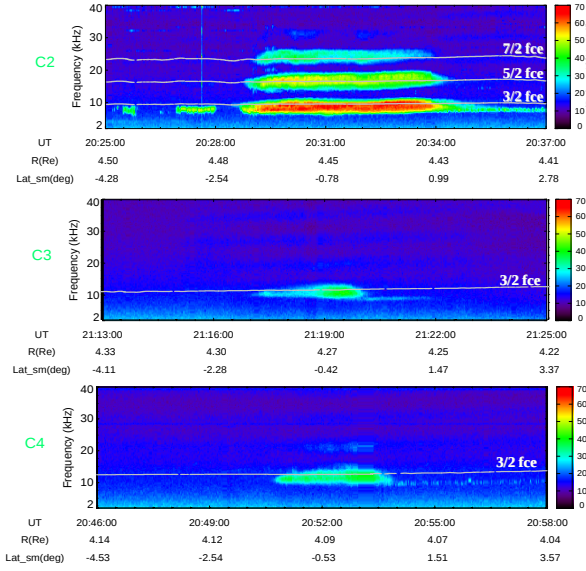


Fig. 3 Equatorial emissions at $(n+1/2) f_{ce}$.

The good sensitivity of the WHISPER instrument allows a precise determination of the maximum frequency of the harmonic. Intensity variation of the waves shows a maximum about $10^{-4} \text{ V}_{\text{rms}} \text{ m}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ at the magnetic equator corresponding to a maximum value of the bandwidth about 3kHz.

3.2 Higher latitude emissions at $(n+1.1) f_{ce}$

Another kind of electrostatic emissions related to f_{ce} can be observed at higher magnetic latitude, both in the northern and in the southern hemisphere. Fig. 4 underlines in white colour one of these “ $1.1 f_{ce}$ ” emissions. It is observed by C1 between 20:20 and 20:55 UT for the northern hemisphere.

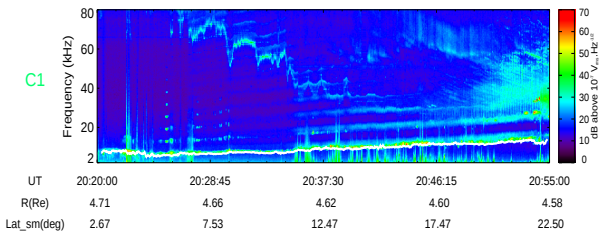


Fig. 4 Emission at $1.1 f_{ce}$ recorded by C1

We can observe that these emissions appear below the plasma frequency and at $(n+1.1)f_{ce}$. They show up on the four CLUSTER satellites with various numbers of harmonics in each hemisphere.

We have represented the frequency time variation of these emissions in Fig. 5, for each spacecraft. In this figure, the plasma frequency is plotted in black colour, the experimental $(n+1.1) f_{ce}$ in green and the local corresponding value of $(n+1.1)f_{ce}$ is red.

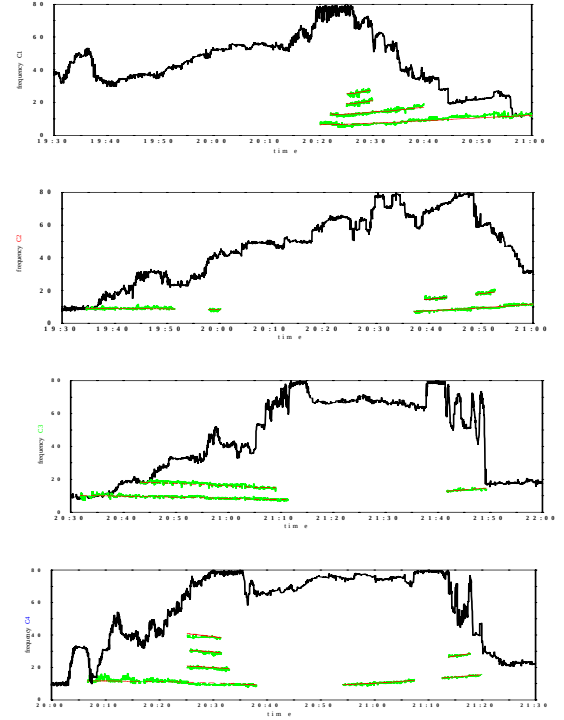


Fig. 5 Evolution with time of $(n+1.1) f_{ce}$ frequencies.

We can observe that these emissions appear in an harmonic form respectively at $1.1 f_{ce}$, $2.1 f_{ce}$, $3.1 f_{ce}$ and $4.1 f_{ce}$ for the four satellites. No emission appear in the southern hemisphere for C1, whereas one emission appear on C2 (discontinue in time) between 19:00 and 20:00 UT, two emissions for C3 between 20:40 and 21:10 UT, and four emissions for C4 around 20:30 UT. In the northern hemisphere, we can notice four emissions on C1, two emissions on C2, one emission on C3 and two emissions on C4.

4. NON THERMAL CONTINUUM EMISSION

NTC radiation is an electromagnetic wave of weak intensity, observed usually during long time intervals. steady in time It has first been observed in the Earth environment at frequencies above 500 Hz [8] and propagating in the L-O mode [9].

In this case event, NTC emissions are observed by three of the four CLUSTER satellites at a particularly intense level, as stated above, in this particular case up to $10^{-5} \text{ V}_{\text{rms}} \text{ m}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$. Electromagnetic emissions

observed by the IMAGE satellite during the time span of the studied event is shown in Fig. 6.

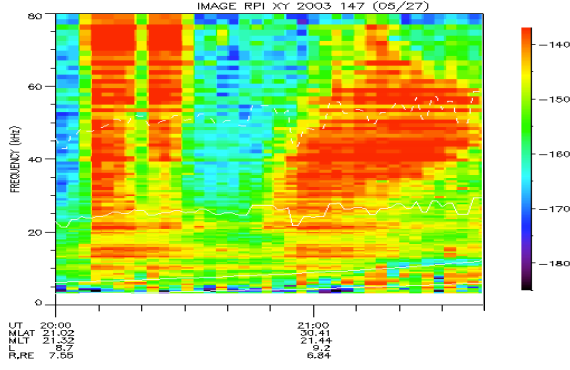


Fig. 6 IMAGE observation of AKR and NTC

The two successive AKR features showing up between 20:00 and 20:40 UT match in time the two main AKR occurrences observed on C3 (Fig.2). The emissions observed after 20:50 UT match in time and frequency the intense NTC occurrence observed by C1, C2 and C4. The orbit configuration of the four observatories between 20:55 and 21:40 UT is shown in Fig.7.

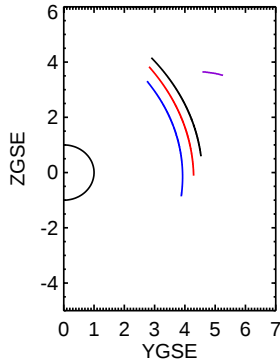


Fig. 7 Orbit configuration of C1, C2, C4 and IMAGE (deep purple) in GSE coordinates (20:55 – 21:40 UT)

A blow up of WHISPER observation of NTC is shown in Fig. 8. NTC appears after the plasmasphere crossing: between 20:50 and 21:50 UT for C1 and C2 in a large and energetic form covering the 20 to 80 kHz band. C4 observes the same phenomenon for a shorter time period. The extinction of the waves below the plasma frequency (plotted as a white line in the figure) indicates a cut off frequency of the ordinary mode. IMAGE observation of the continuum, displayed in Fig. 6, shows the same large and energetic band. NTC observation by IMAGE is made at the same time as by CLUSTER. Moreover, Fig. 7 indicates that it is observed at the same magnetic latitude range. We interpret this as all four observatories, C1, C2, C4 and IMAGE being placed in the same large scale NTC beam.

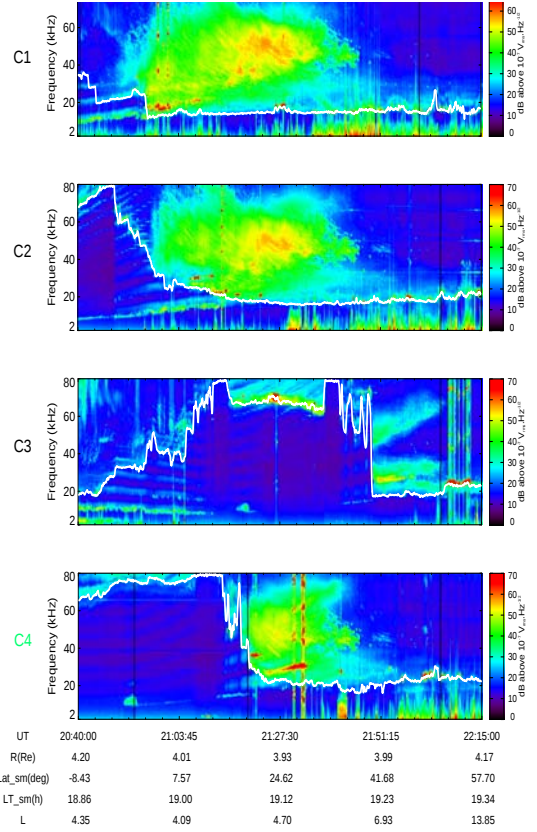


Fig. 8 Blow up of NTC emissions observed by CLUSTER

One hour later C3, going out from the plasmasphere, encounters an NTC beam with different spectral characteristics, as indicated in section 2. Such spectral forms, i.e. smooth frequency bands at weak intensity are observed more frequently. A close look at NTC forms observed on C4 around 21:30 UT (Fig. 8) indicates that C4 observes both types of NTC superposed: the intense beam (with falling frequency tunes), and the weaker form (above 60 kHz, with globally rising frequency tunes). The latter form does not match (in time and frequency) similar features shown on C3. It is likely, thus, that the second type of NTC is linked to spatial properties of the beams, rather than to temporal properties.

5. CONCLUSION

Several kinds of natural emissions have been observed during the 27th May 2003 plasmasphere crossing. Emissions related to the local gyrofrequency f_{ce} have been observed near equatorial regions at $(n+1/2)f_{ce}$ and at higher magnetic latitude at $(n+1.1)f_{ce}$. Intense NTC continuum features have been observed in conjunction with IMAGE satellite, i.e. at the same time and at the same magnetic latitude, showing that all SC are placed inside the same beam. Further analysis is needed to explore possible relationships between some of the

various electrostatic emissions observed and the generation of NTC.

6. REFERENCES

1. Lemaire, J. F., and K. I. Gringauz, *The Earth's plasmasphere*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1998
2. Christiansen, P. J., Gough, M. P., Martelli, G., Bloch, J. J., Cornilleau, N., Etcheto, J., Gendrin, R., Beghin, C., Décréau, P. M. E., and Jones, D.: "Geos-1 observations of electrostatic waves and their relationship with plasma parameters", *Space. Sci. Rev.*, 22, 283–400, 1978.
3. Olsen, R. C., S. D. Shawhan, D. L. Gallagher, J. L. Green, C. R. Chappel, and R. R. Anderson, "Plasma observations at the earth's magnetic equator", *J. Geophys. Res.*, 92, 2385, 1987.
4. Décréau, P. M. E., Ferreau, P., Krasnoselskikh, V., Lévêque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Sené, F. X., Trotignon, J. G., Canu, P., Mogensen, P. B., and Whisper investigators, "Whisper, a resonance sounder and wave analyser: performances and perspectives for the CLUSTER mission", *Space Sci. Rev.*, 79, 157–193, 1997.
5. Escoubet, C. P., Russell, C. T., and Schmidt, R. *The Cluster and Phoenix Missions*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
6. Darrouzet, F., De Keyser, J., Décréau, P. M. E., Gallagher, D. L., Pierrard, V., Lemaire, J. F., Sandel, B. R., Dandouras, I., Matsui, H., Dunlop, M., Cabrera, J., Masson, A., Canu, P., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., André, M., Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations and numerical simulations, *Cluster and Double Star symposium 5th anniversary of Cluster in Space, this issue*.
7. Kennel, C. F., F. V. Scarf, R. W. Fredricks, J. H. McGehee, and F. V. Coroniti, VLF electric field observations in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 75, 6136 1970.
8. Gurnett, D. A., The earth as a radio source: the nonthermal continuum, *J. Geophys. Res.*, 80, 2751, 1975.
9. Gurnett, D. A., W. Calvert, R. L. Huff, D. Jones, and M. Sugiura, The polarization of escaping terrestrial continuum radiation, *J. Geophys. Re.*, 93, 12817, 1988.

Bibliographie

AKASOFU, S.-I., The development of the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, 12, 273, 1964.

ASHOUR-ABDALLA, M., and KENNEL, C., in “Physics of the Hot Plasma in the Magnetosphere”, B. HULTQVIST and L. Stenflow, eds., Plenum, New York, 201, 1975.

ASHOUR-ABDALLA, M., and C. F. KENNEL, Nonconvective and convective electron cyclotron harmonic instabilities, *J. Geophys. Res.*, 83, 1531, 1978a.

ASHOUR-ABDALLA, M., and C. F. KENNEL, Multi-harmonic electron cyclotron instabilities. *Geophys. Res. Lett.*, 5, 711-714, 1978b

BALOGH, A., M.W. DUNLOP, S.W. H. COWLEY, D. J. SOUTHWOOD, J. G. THOMLINSON, K.-H. GLASSMEIER, G. MUSMANN, H. LUHR, S. BUCHERT, M. H. ACUÑA, D. H. FAIRFIELD, J. A. SLAVIN, W. RIEDLER, K. SCHWINGENSCHUH, M. G. KIVELSON et THE CLUSTER MAGNETOMETER TEAM, The Cluster Magnetic Field Investigation, *Space Sci. Rev.*, 79, 65–91, 1997.

BALOGH, A., C., M. CARR, M. H. ACUÑA, et al. The Cluster Magnetic Field Investigation: overview of in-flight performance and initial results, *Ann. Geophys.*, 19, 1207, 2001.

BARBOSA, D. D, Electrostatic wave propagation and trapping near the magnetic equator, AA(California, University, Los Angeles, CA), *Ann. Geophys.* (ISSN 0755-0685), vol. 3, Jan.-Feb. 1985, p. 63-72.

- BARKER, F. S., D. R. BARRACLOUGH, V. P. GOLOVKOV, et al., International geomagnetic reference field revision, EOS, Trans. Am. Geophys. Union, 67, 524, 1986.
- BARTELS, J., N. H. HECK, and H. F. JOHNSTON, The three-hour-range index measuring geomagnetic activity, it J. Geophys. Res., 44, 411, 1939.
- BAUMJOHANN, W., et R. A. TREUMANN, Basic space plasma physics, Imperial coll. Press, London, 1996
- BEGHIN, C., DECREAU, P. M. E., PICKETT, J., et al. Modeling of CLUSTER's electric antennas in space: application to plasma diagnostics. Radio Science, 40, 1-18, 2005.
- BELMONT, G., FONTAINE, D., and CANU, P. Are equatorial electron cyclotron waves responsible for diffusive auroral electron precipitation ? J. Geophys. Res., 88, 9163-9170, 1983.
- BERNSTEIN, I. B., Waves in a plasma in a magnetic field, Phys. Rev., 109, 10, 1958.
- BEZRUKIKH, V. V. et K. I. GRINGAUZ, The hot zone in the outer plasmasphere of the Earth, J. Atmos. Terr. Phys., 38, 1085–1091, 1976.
- BIERMAN, L., Kometschweife und solare korpuskularstrahlung, *Zeitschrift für astrophysik*, 29, 274, 1951.
- BIRDSALL, CK, AB LANGDON, Plasma Physics via Computer Simulation - Mac Graw-Hill, New York, 1985.
- BUNEMAN, O, 1959, Dissipation of currents in ionized Media, Phys. Rev. 115,503, 1959.
- BURTON, R. K., R. L. MC PHERRON, and C. T. RUSSELL, The terrestrial magnetosphere: A half-wave rectifier of the interplanetary electric field, Science, 189, 717, 1975.
- CANU, P., DECREAU, P. M. E., TROTIGNON, J. G., et al. Identification of natural plasma emissions observed close to the plasmopause by the Cluster-Whisper relaxation sounder. Ann. Geophys., 19, 1697-1709, 2001.
- CANU, P, P. DECREAU, F.EL-LEMDANI MAZOUZ, S.GRIMALD, W. S. KURTH, Plasma waves close to the electron plasma frequency Recent observations at Earth and Saturn, ISSS-8 Kauai, Hawaii, February 28, 2007.
- CARPENTER, D. L., Whistler evidence of a “knee” in the magnetospheric ionization density profile, J. Geophys. Res., 68, 1675–1682, 1963.
- CARPENTER, D. L., Whistler studies of the plasmopause in the magnetosphere, 1. Temporal variations in the position of the knee and some evidence on plasma motions

- near the knee, *J. Geophys. Res.*, 71, 693–709, 1966.
- CARPENTER, D. L. Whistler evidence of the dynamic behavior of the duskside bulge in the plasmasphere. *J. Geophys. Res.*, 75, 3837–3847, 1970.
- CARPENTER, D. L. et J. LEMAIRE, The Plasmasphere Boundary Layer, *Ann. Geophys.*, 22, 4291–4298, 2004.
- CHAPMAN, S. et V. C. A. FERRARO, A new theory of magnetic storms, Part I, The initial phase, *Terr. Mag. Atmos. Elect.*, 36, 77–97, 1931.
- CHAPPELL, C. R., K. K. HARRIS et G.W. SHARP, The morphology of the bulge region of the plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, 75, 3848–3861, 1970a.
- CHAPPELL, C. R., K. K. HARRIS et G.W. SHARP, A study of the influence of magnetic activity on the location of the plasmapause as measured by OGO 5, *J. Geophys. Res.*, 75, 50–56, 1970b.
- CHRISTIANSEN, P.J., M.P. GOUGH, G. MARTELLI, J.J. BLOCH, N. CORNILLEAU, J. ETCHETO, R. GENDRIN, D. JONES, C. BEGHIN and P. DECREAU, *Nature* 272, 683 (1978a).
- CHRISTIANSEN, P.J., M.P. GOUGH, G. MARTELLI, J.J. BLOCH, N. CORNILLEAU, J. ETCHETO, R. GENDRIN, C. BEGHIN, P. DECREAU and D. JONES, *Space Science Reviews* 22, 383 (1978b).
- COMFORT, R. H., Plasmasphere thermal structure as measured by ISEE-1 and DE-1, *Adv. Space Res.*, 6, 31, 1986.
- CORNILLEAU-WEHRLIN, N., P. CHAUVEAU, S. LOUIS, A. MEYER, J. M. NAPPA, S. PERRAUT, L. REZEAU, P. ROBERT, A. ROUX, C. DE VILLEDARY, Y. DE CONCHY, L. FRIEL, C. C. HARVEY, D. HUBERT, C. LACOMBE, R. MANNING, F. WOUTERS, F. LEFEUVRE, M. PARROT, J. L. PINÇON, B. POIRIER, W. KOFMAN et P. LOUARN, The Cluster Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuations (STAFF) Experiment, *Space Sci. Rev.*, 79, 107–136, 1997.
- DARROUZET, F., P.M. E. DÉCRÉAU, J. DE KEYSER, A. MASSON, D. L. GALLAGHER, O. SANTOLÍK, B. R. SANDEL, J. G. TROTIGNON, J. L. RAUCH, E. LE GUIRRIEC, P. CANU, F. SEDGEMORE, M. ANDRÉ et J. F. LEMAIRE, Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations, *Ann. Geophys.*, 22, 2577–2585, 2004.
- DARROUZET, F., J. DE KEYSER, P. M. E. DÉCRÉAU, D. L. GALLAGHER, V. PIERRARD, J. F. LEMAIRE, B. R. SANDEL, I. DANDOURAS, H. MATSUI, M. DUNLOP, J. CABRERA, A. MASSON, P. CANU, J. G. TROTIGNON, J. L. RAUCH et M. ANDRÉ, Analysis of

- plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations, *Ann. Geophys.*, 24, 1737–1758, 2006a.
- DARROUZET, F., J. DE KEYSER, P. M. E. DÉCRÉAU, J. F. LEMAIRE et M. W. DUNLOP, Spatial gradients in the plasmasphere from Cluster, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08 105, doi: 10.1029/2006GL025727, 2006b.
- DAVIS, T. N., and M. SUGIURA, Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, *J. Geophys. Res.*, 71, 785, 1966.
- DAWSON, J. M., Particle simulation of plasmas, *Reviews of Modern Physics*, vol. 55, No. 2, 1983
- DÉCRÉAU, P. M. E., P. FERGEAU, V. KRASNOSELS'KIKH, M. LÉVÊQUE, Ph. MARTIN, O. RANDRIAMBOARISON, F. X. SENÉ, J. G. TROTIGNON, P. CANU, P. B. MÖGENSEN et Whisper INVESTIGATORS, WHISPER, A Resonance Sounder and Wave Analyser: Performances and Perspectives for the Cluster Mission, *Space Sci. Rev.*, 79, 157–193, 1997.
- DÉCRÉAU, P. M. E., V. KRASNOSELS'KIKH, J. L. RAUCH, O. RANDRIAMBOARISON, J. G. TROTIGNON, P. FERGEAU, E. LE GUIRRIEC, M. LÉVÊQUE, Ph. MARTIN, H. C. SÉRAN, F. X. SENÉ, J. P. VILLAIN, P. CANU, N. CORNILLEAU, H. DE FÉRAUDY, H. ALLEYNE, K. YEARBY, G. GUSTAFSSON, F. DARROUZET, J. LEMAIRE, P. TRAVNICEK, V. FIALA, S. CHAPMAN, D. A. GURNETT et C. C. HARVEY, Early results from the Whisper experiment on Cluster: an overview, *Geophys. Res. Abstr.*, 3, 2001.
- DUNCKEL, N., and HELLIWELL, R. A., Whistler mode emissions on the OGO 1 satellite, *J. Geophys. Res.*, 74, 6731, 1969
- EL-LEMDANI MAZOUZ, F., GRIMALD, S., RAUCH, J. L., DÉCRÉAU, P. M. E., BOZAN, G., LE ROUZIC, G., Suraud, X., Vallières, X., Trotignon, J. G., Canu, P., Darrouzet, F., et BOARDSEN, S. Electrostatic and electromagnetic emissions near the plasmasphere. A case event: 27 May 2003, *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5th Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, Janvier 2006*
- EL-LEMDANI MAZOUZ, F., RAUCH, J. L., DECREAU, P. M. E., VALLIERES, X., DARROUZET, F., CANU, P., and SURAUD, X.: /Wave emissions at half electron gyroharmonics in the equatorial plasmasphere region: CLUSTER observations and statistics/, *Adv. Space Res.*, in press, 2008.
- ELPHIC, R. C., L. A. WEISS, M. F. THOMSEN, D. J. MCCOMAS et M. B. MOLDWIN, Evolution of plasmaspheric ions at geosynchronous orbit during times of high geomagnetic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2189–2192, 1996.
- ESCOUBET, C. P., C. T. RUSSELL et R. SCHMIDT, eds., *The Cluster and Phoenix Missions*, 658pp., Kluwer Academic Publishers, 1997.

- FARREL, W. M., Direct generation of O mode emission in a dense, warm plasma: Applications to interplanetary type II emissions and others in its class, *J. Geophys. Res.*, 106, 15,701 – 15,709, 2001.
- FREDRICKS, R.W., *J. Geophys. Res.*, 76, 5344, 1971.
- FREDRICKS, R.W. and F.L. SCARF, Recent studies of magnetospheric electric field emissions above the electron gyrofrequency, *J. Geophys. Res.* 78, 310, 1973
- FRIED, B. D. et CONTE, S D, The plasma dispersion function, Aced. Press. New York, 1961.
- GANGULI, G., M. A. REYNOLDS et M. W. LIEMOHN, The plasmasphere and advances in plasmaspheric research, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 62, 1647–1657, 2000.
- GOLD T., Plasma and Magnetic Fields in the Solar System, *J. Geophys. Res.*, 64, 1665–1674, 1959.
- GOUGH, M. P., CHRISTIANSEN, P. J., MARTELLI, G., et al. Interaction of electrostatic waves with warm electrons at the geomagnetic equator, *Nature*, 279, 515-517, 1979.
- GOUGH, M. P., CHRISTIANSEN, P. J., and GERSHUNY, E. J. E.S. Wave morphology near the geostationary orbit. *Adv. Space Res.*, 1, 337-343, 1981
- GRINGAUZ, K. I., The structure of the ionized gas envelope of the Earth from direct measurements in the USSR of local charged particle concentrations, *Planet. Space Sci.*, 11, 281–296, 1963.
- GURNETT, D. A., R. L. HUFF et D. L. KIRCHNER, The Wide-Band Plasma Wave Investigation, *Space Sci. Rev.*, 79, 195–208, 1997.
- GUSTAFSSON, G., R. BOSTRÖM, B. HOLBACK, G. HOLMGREN, A. LUNDGREN, K. STASIEWICZ, L. ÅHLÉN, F. MOZER, D. PANKOW, P. HARVEY, P. BERG, R. ULRICH, A. PEDERSEN, R. SCHMIDT, A. BUTLER, A.W. C. FRANSEN, D. KLINGE, M. THOMSEN, C.-G. FÄLTHAMMAR, P.-A. LINDQVIST, S. CHRISTENSON, J. A. HOLTET, B. LYBEKK, T. A. STEN, P. TANSKANEN, K. LAPPALAINEN et J. WYGANT, The Electric Field and Wave Experiment for the Cluster Mission, *Space Sci. Rev.*, 79, 137–156, 1997.
- HAMELIN, M., Thèse de Doctorat « Contribution A L'étude Des Ondes Electrostatiques Et Electromagnétiques Au Voisinage De La Fréquence Hybride Basse Dans Un Plasma Ionosphérique ». 1978
- HEIKKILA, W. J. and J. D. WINNINGHAM. Penetration of magnetosheath plasma to low altitudes through the dayside magnetospheric cusps. *J. Geophys. Res.*, 76,

- 883–891, 1971.
- HORNE, R.B., ECH waves in the magnetosphere as observed by EOS 1, Ph. D. Thesis, University of Sussex, 1981.
- HORNE, R. B., The contribution of wave particle interactions to electron loss and acceleration in the earth's radiation belts during geomagnetic storms, in *The review of radio science*, edited by W. R. Stone, pp. 801–828, IEEE Press, Piscataway, 2002.
- HORNE, R. B., THORNE, R. M., MEREDITH, N. P., et al. Diffuse auroral electron scattering by electron cyclotron harmonics and whistler mode waves during an isolated substorm. *J. Geophys. Res.*, 108, 1290-1302, 2003.
- HORWITZ, J. L., MENTEER, S., TURNLEY, J., et al. Plasma boundaries in the inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 91, 8861-8882, 1986.
- HUBBARD, R. F., and BIRMINGHAM, T. J. Electrostatic emissions between electron gyroharmonics in the outer magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 83, 4837-4850, 1978.
- JOHNSTONE, A. D., D. M. WALTON, R. LIU, and D. HARDY, Pitch angle diffusion of low-energy electrons by whistler mode waves, *J. Geophys. Res.*, 98, 5959, 1993.
- JOHNSTONE, A. D., C. ALSOP, S. BURGE, P. J. CARTER, A. J. COATES, A. J. COKER, A. N. FAZAKERLEY, M. GRANDE, R. A. GOWEN, C. GURGIOLO, B. K. HANCOCK, B. NARHEIM, A. PREECE, P. H. SHEATHER, J. D. WINNINGHAM et R. D. WOODLIFFE, PEACE: A Plasma Electron and Current Experiment, *Space Sci. Rev.*, 79, 351–398, 1997.
- KAMIMURA, T, T. WAGNER, and J. M. DAWSON, Simulation study of Bernstein modes, *Phys. Fluids* 21, 1151 (1978)
- KARPMAN, V.I., ALEKHIN, JU. K., BORISOV, N.O., and RAJABOVA, N.A., *Astrophys. Space Sci.*, 22, 267, 1973 a.
- KARPMAN, V.I., ALEKHIN, JU. K., BORISOV, N.D., and RAJABOVA, N.A., *Phys. Lett.*, 44, 205, 1973 b.
- KARPMAN, V.I., ALEKHIN, JU. K., BORISOV, N.D., and RAJABOVA, N.A., *Plasma Phys.*, 17, 361, 1975 a.
- KARPMAN, V.I., ALEKHIN, JU. K., BORISOV, N.D., and RAJABOVA, N.A., *Plasma Phys.*, 17, 937, 1975 b.

- KENNEL, C. F., SCARF, F. V., FREDRICKS, R. W., et al. VLF electric field observations in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 75, 6136-6149, 1970.
- KENNEL, C. F. and ASHOUR-ABDALLA, M. Electrostatic waves and the strong diffusion of magnetospheric electrons. In *Magnetospheric plasma physics* edited by A. Nishida, 245 pp., D. Reidel, Hingham, Mass., 1982.
- KOONS, H. C., and FENNELL, J. F. Fine structure in electrostatic emission bands between electron gyrofrequency harmonics (from magnetospheric observations). *J. Geophys. Res.*, 89, 3015-3018, 1984.
- KOZYRA, J. U., V. K. JORDANOVA, R. B. HORNE, R. M. THORNE, Modeling of the contribution of electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves to stormtime ring current erosion, in *Magnetic Storms*, edited by B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, Y. Kamide, and J. K. Arballo, pp. 187-202, American Geophysical Union, Washington D.C., 1997.
- KRAFFT, C., MATTHIEUSSENT, G., THEVENET, P., et al. Simultaneous emissions at $n\omega_c$ and $(n + \frac{1}{2})\omega_c$ in space and laboratory plasmas. *J. Geophys. Res.*, 97(A10), 14977-14987, 1992.
- KURTH, W.S., J.D. CRAVEN, L.A. FRANCK and GURNETT, Intense electrostatic waves near the upper hybrid resonance frequency, *J. Geophys. Res.* 84, 4145, 1979 a.
- KURTH, W.S., M. ASHOUR-ABDALLA, L.A. FRANCK, C.F. KENNEL, D.A. GURNETT, D.D. SENTMAN and B.G. BUREK, A comparison of intense electrostatic waves near f_{uhr} with linear instability theory, *J. Geophys. Res. Lett.* 6, 487, 1979 b.
- KURT, W.S., D.D. BARBOSA, D.A. GURNETT and F.L. SCARF, Electrostatic waves in the jovian magnetosphere, *J. Geophys. Res. Lett.* 7, 57, 1980.
- KURTH, W. S., D. A. GURNETT, et R. R. ANDERSON, Escaping non-thermal continuum radiation, *J., Geophys. Res.*, 96, 5519, 1981.
- KURTH, W. S., and GURNETT, D. A. Plasma waves in Planetary magnetospheres. *J. Geophys. Res.*, 96, 18977-18991, 1991.
- LAAKSO, H. et A. PEDERSEN, Ambient electron density derived from differential potential measurements, in *Measurements Techniques in Space Plasmas*, édité par J. Borovsky, P. Pfaff, et D. Young, pp. 49-54, AGU Geophysical Monograph Series, 102, 1998.
- LA BELLE, J., RUPPERT, D. R., and TREUMAN, R. A.: A statistical study of banded magnetospheric emissions, *J. Geophys. Res.*, 104, 293-303, 1999.

- LEE, L. C., A Review of Magnetic Reconnection: MHD Models, in Physics of the Magnetopause, édité par P. Song, B. U. O. Sonnerup, et M. F. Thomsen, pp. 139–153, AGU Geophysical Monograph Series, 90, 1995.
- LEMAIRE, J. F. et K. I. GRINGAUZ, édés., The Earth's Plasmasphere, 372 pp., Cambridge University Press, New York, 1998.
- LUI, A. T. Y, R. W. MC ENTIRE, and S. M. KRIMIGIS, Evolution of the ring current during 2 geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 92, 7459, 1987.
- LYONS, L. R., Electron diffusion driven by magnetospheric electrostatic waves, 79, 575, 1974.
- MEREDITH et al, Advances in Space Research, Volume 25, Issue 12, p. 2339-2342., An Investigation Into the Roles of ECH and Whistler Mode Waves in the Formation Of "Pancake" Electron Distributions Using Data From the CRRES Satellite
- MC ILWAIN, C. E., A Kp dependent equatorial electric field model, *Adv. Space Res.*, 6, 187, 1986.
- MOLDWIN, M. B., J. HOWARD, J. SANNY, J. D. BOCCHICCHIO, H. K. RASSOUL et R. R. ANDERSON, Plasmaspheric plumes: CRRES observations of enhanced density beyond the plasmopause, *J. Geophys. Res.*, 109, A05 202, doi:10.1029/2003JA010320, 2004.
- MOSIER, S.R., M.L. KAISER and L.W. BROWN, Observation of noise bands associated with the upper hybrid resonance by the IMP 6 radio astronomy experiment, *J. Geophys. Res.* 78, 1673, 1973
- MOULLARD, O., A. MASSON, H. LAAKSO, M. PARROT, P. M. E. DÉCRÉAU, O. SANTOLÍK et M. ANDRÉ, Density modulated whistler mode emissions observed near the plasmopause, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1975, doi:10.1029/2002GL015101, 2002.
- MURAYAMA, T., Coupling function between solar wind parameters and geomagnetic indices, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 623, 1982.
- NEMEC, F., SANTOLIK, O., GEROVA, K., MACUSOVA, E., DE CONCHY, Y., MAKSIMOVIC, M., CORNILLEAU-WEHRLIN, N.: Equatorial noise: Statistical study of its localization and the derived number density. *Adv. Space Res.* 37(3), 610–616 , 2006
- NESS, N. F., The Earth's magnetic tail, *J. Geophys. Res.*, 70, 2989–3005, 1965.
- OKUDA, C. and J. M. DAWSON, *Phys Fluids* 16, 408 (1973)
- PARANICAS, C., HUGHES, W. J., SINGER, H. J., et al. Banded electrostatic emissions observed by the CRRES plasma wave experiment. *J. Geophys. Res.*, 97(A9), 13889-

- 13898, 1992.
- PARKER, E. N., Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields, *Astrophys. J.*, 128, 664, 1958.
- PARROT, M., SANTOLIK, O., CORNILLEAU-WEHLIN, N., et al. Source location of chorus emissions observed by Cluster. *Ann. Geophys.*, 21, 473-480, 2003
- PASCHMANN, G., F. MELZNER, R. FRENZEL, H. VAITH, P. PARIGGER, U. PAGEL, O. H. BAUER, G. HAERENDEL, W. BAUMJOHANN, N. SCKOPKE, R. B. TORBERT, B. BRIGGS, J. CHAN, K. LYNCH, K. MOREY, J. M. QUINN, D. SIMPSON, C. YOUNG, C. E. MCILWAIN, W. FILLIUS, S. S. KERR, R. MAHEU et E. C. WHIPPLE, The Electron Drift Instrument for Cluster, *Space Sci. Rev.*, 79, 233–269, 1997.
- PEDERSEN, A., N. CORNILLEAU-WHERLIN, B. DE LA PORTE, A. ROUX, A. BOUABDELLAH, P. M. E. DÉCRÉAU, F. LEFEUVRE, F. X. SENÉ, D. GURNETT, R. HUFF, G. GUSTAFSSON, G. HOLMGREN, L. WOOLLISCROFT, H. St. C. ALLEYNE, J. A. THOMPSON et P. N. H. DAVIES, The Wave Experiment Consortium (WEC), *Space Sci. Rev.*, 79, 157–193, 1997.
- PIERRARD, V., AND CABRERA, J. Comparison between EUV/IMAGE observations and numerical simulations of the plasmopause formation. *Ann. Geophys.*, 23, 2635-2646, 2005.
- QUEMADA., D. « Ondes dans les plasmas – Physique spatiale » Edition Hermann, 1968
- RAUCH J. L., SURAUD X., DECREAU P.M.E., et al., Automatic determination of the plasma frequency using image processing on whisper data. Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium – 5th Anniversary of Cluster in Space, Noordwijk, The Netherlands, 19-23 September 2005, ESA SP-598, January 2006.
- RÈME, H., J. M. BOSQUED, J. A. SAUVAUD, A. CROS, I. DANDOURAS, C. AOUSTIN, J. BOUYSSOU, Th. CAMUS, J. CUVILO, C. MARTZ, J. L. MÉDALE, H. PERRIER, D. ROMEFORT, J. ROUZAUD, C. D’USTON, E. MÖBIUS, K. CROCKER, M. GRANOFF, L. M. KISTLER, M. POPECKI, D. HOVESTADT, B. KLECKER, G. PASCHMANN, M. SCHOLER, C. W. CARLSON, D. W. CURTIS, R. P. LIN, J. P. MCFADDEN, V. FORMISANO, E. AMATA, M. B. BAVASSANO-CATTANEO, P. BALDETTI, G. BELLUCI, R. BRUNO, G. CHIONCHIO, A. DI LELLIS, E. G. SHELLEY, A. G. GHIEMMETTI, W. LENNARTSSON, A. KORTH, H. ROSENBAUER, R. LUNDIN, S. OLSEN, G. K. PARKS, M. MCCARTHY et H. BALSIGER, The Cluster Ion Spectrometry (CIS) Experiment, *Space Sci. Rev.*, 79, 303–350, 1997.
- RIEDLER, W., K. TORKAR, F. RÜDENAUER, M. FEHRINGER, A. PEDERSEN, R. SCHMIDT, R. J. L. GRARD, H. ARENDS, B. T. NARHEIM, J. TROIM, R. TORBERT, R. C. OLSEN, E. WHIPPLE, R. GOLDSTEIN, N. VALAVANOGLOU et H. ZHAO, Active Spacecraft

- Potential Control, *Space Sci. Rev.*, 79, 271–302, 1997.
- ROEDER, J. L., and KOONS, H. C. Survey of electron cyclotron waves in the magnetosphere and the diffuse auroral electron precipitation. *J. Geophys. Res.*, 94, 2529-2541, 1989.
- RONMARK, K., H. BORG, P.J. CHRISTIANSEN, M.P. GOUGH and D. JONES, Banded electron cyclotron harmonic instability – a first comparison of theory and experiment, *Space Sci. Rev.* 22, 401, 1978.
- RONMARK, K. and P.J. CHRISTIANSEN, Dayside electron cyclotron harmonic emissions, *Nature* 294, 355, 1981.
- RÖNNMARK, K.: Generation of magnetospheric radiation by decay of Bernstein waves, *Geophys. Res. Letters*, 12, 639-642, 1985.
- RONNMARK, K. Quantitative methods for waves in space plasmas, *Space Science Reviews* (ISSN 0038-6308), vol. 54, no. 1-2, 1990, p. 1-73.
- RUSSELL, C. T., The structure of the magnetopause, *Planet. Space Sci.*, 51, 731–744, 2003.
- SCARF, F.L., FREDRICKS, R.W., KENNEL, C.F., and CORONITI, F.V., *J. Geophys. Res.*, 78, 3119, 1973
- SHAW, R.R. and D.A. GURNETT, Electrostatic noise bands associated with the electron gyrofrequency and plasma frequency in the outer magnetosphere, *J. Geophys. Res.* 80, 459, 1975.
- SPASOJEVI, M., 'C, J. GOLDSTEIN, D. L. CARPENTER, U. S. INAN, B. R. SANDEL, M. B.MOLDWIN et B. W. REINISCH, Global response of the plasmasphere to a geomagnetic disturbance, *J. Geophys. Res.*, 108, 1340, doi:10.1029/2003JA009987, 2003.
- SENTMAN, D.D., L.A. FRANK, D.A. GURNETT, W.S. KURTh, and C.F. KENNEL, Electron distribution function associated with Electrostatic Emissions in the Dayside Magnetosphere *Geophys. Res. Lett.*, 6, 10, 781-784, 10-1-1979
- STIX, T. H. , “waves in plasma”, Edition AIP 1992.
- SUGIURA, M., Hourly values of equatorial Dst for IGY, in *Annals of the International Geophysical Year*, 35, pp. 945–948, Pergamon Press, Oxford, 1964.
- TATARONIS, J.A. ; CRAWFORD, F.W., Cyclotron Harmonic Wave Propagation and Instabilities. II. Oblique Propagation, *J. Plasma Phys.* ;4: 249-64(May 1970).

- TROTIGNON, J. G., DECREAU, P. M. E., RAUCH, J. L., et al. How to determine the thermal electron density and the magnetic field strength from the Cluster/Whisper observations around the Earth. *Ann. Geophys.*, 19, 1711-1720, 2001.
- TROTIGNON, J. G., P.M. E. DÉCRÉAU, J. L. RAUCH, E. LE GUIRRIEC, P. CANU et F. DARROUZET, The Whisper Relaxation Sounder Onboard Cluster: A Powerful Tool for Space Plasma Diagnosis around the Earth, *Cosmic Research*, 41, 369–372, 2003.
- TSYGANENKO, N. A., ET D. P. STERN, Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems, *J. Geophys. Res.*, 101, 27 187–27 198, 1996.
- USUI, H., MATSUMOTO, H. MUKAI, T. et al. GEOTAIL observation of electron cyclotron harmonic waves near the dayside magnetopause. *Adv. Space Res.*, Volume 24, Issue 1, p. 99-102, 1999.
- VASSILJEVIC, C., Application des processeurs de traitement du signal à l'analyse spectrale temps reel in situ d'onde radio fréquence du plasma spatial, Sciences physiques, thèse de Doctorat, Orsay, 1990
- WILKEN, W. I., B. AND AXFORD, I. DAGLIS, P. DALY, W. GÜTTLER, W. H. IP, A. KORTH, G. KREMSE, S. LIVI, V. M. VASYLIUNAS, J. WOCH, D. BAKER, R. D. BELIAN, J. B. BLAKE, J. F. FENNELL, L. R. LYONS, H. BORG, T. A. FRITZ, F. GLIEM, R. RATHJE, M. GRANDE, D. HALL, K. KECSUEMÉTY, S. MCKENNA-LAWLOR, K. MURSULA, P. TANSKANEN, Z. PU, I. SANDAHL, E. T. SARRIS, M. SCHOLER, M. SCHULZ, F. SØRASS et S. ULLALAND, RAPID - The Imaging Energetic Particle Spectrometer on Cluster, *Space Sci. Rev.*, 79, 399–473, 1997.
- WOOLLISCROFT, L. J. C., H. ST. C. ALLEYNE, C. M. DUNFORD, A. SUMNER, J. A. THOMPSON, S. N. WALKER, K. H. YEARBY, A. BUCKLEY, S. CHAPMAN, P. GOUGH et the DWP INVESTIGATORS, The Digital Wave-Processing Experiment on Cluster, *Space Sci. Rev.*, 79, 209–231, 1997.
- YOUNG, T.S.T., J.D. CALLEN and J.F. MC CUNE, High frequency waves in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.* 78, 1082, 1973.

Publications et Communications

1 Publications avec Comité de Lecture

F. El-Lemdani Mazouz, Rauch, J. L., Decreau, P. M. E., Vallieres, X., Darrouzet, F., Canu, P., and Suraud, X.

Wave emissions at half electron gyroharmonics in the equatorial plasmasphere region: CLUSTER observations and statistics,

Adv. Space Res., in press 2007

F. Darrouzet, J. De Keyser, P. M. E. Décréau, F. El Lemdani-Mazouz, and X. Vallières:
Statistical analysis of plasmaspheric plumes with CLUSTER/WHISPER observations,
Ann. Geophys., in press, 2008.

2 Autres publications

F. El-Lemdani Mazouz, S Grimald, J.L. Rauch, P.M.E. Décréau, G. Bozan, G. Le Rouzic, X. Suraud, X Vallières, J. G Trotignon, P. Canu, F. Darrouzet.,
Electrostatic and electromagnetic emissions near the plasmasphere. A case event: 27 May 2003.

Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium – 5th Anniversary of Cluster in Space, Noordwijk, The Netherlands, 19 - 23 September 2005, ESA SP-598, January 2006

3 Communications Orales lors de Congrès Internationaux

F. El-Lemdani Mazouz , J. L. Rauch, P. M. E. Décréau, S. Grimald, X. Suraud, X Vallières, A. Rochel, J. G. Trotignon, P. Canu, F. Darrouzet

Cluster survey of intense electrostatics emissions in the plasmasphere region.

Workshop CLUSTER, Spatio Temporal Analysis Multipoint Measurment in Space 2, STAMMS2 ; Orléans-France, 24-28 Septembre 2007,

F. El-Lemdani Mazouz and the WHISPER team

Natural emissions in the plasmasphere;

Workshop Plasmasphere (The Earth's plasmasphere a cluster image and modelling perspective). IASB-BIRA-Brussels Belgium. 19-21 Septembre 2007.

F. El-Lemdani Mazouz , J. L. Rauch , P. M. E. Décréau , S. Grimald , X. Suraud , X Vallières , A. Rochel, P. Canu , F. Darrouzet , D. Fontaine, J. S. Pickett

Waves and Particle data in the Plasmasphere region: case events study ; .

12th Cluster Workshop, Saariselka, Lapland, Finland 11-15 Septembre 2006.

F. El-Lemdani Mazouz, J. L. Rauch , P. M. E. Décréau, S. Grimald, X. Suraud, X Vallières, J. G. Trotignon , P. Canu , F. Darrouzet

Electrostatic and Electromagnetic emissions in the Plasmasphere, A statistical Study with WHISPER/CLUSTER data;

36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, China, 16 – 23 July 2006

4 Communications Poster lors de Congrès Internationaux

F. El-Lemdani Mazouz , J. L. Rauch , P. M. E. Décréau , S. Grimald , X. Suraud , X Vallières , P. Canu , F. Darrouzet , A. Masson D. Fontaine

Electrostatic emissions observed by CLUSTER/WHISPER experiment in the outer plasmasphere near the equator: Study of two case events.

European Geosciences Union (EGU), General Assembly 2006, Vienna, Austria, 02 – 07 April 2006

F. El-Lemdani Mazouz , J.L. Rauch , P.M.E. Décréau , S. Grimald , G. Bozan , G. Le Rouzic , X. Suraud , X. Vallières , J. G Trotignon , P. Canu , F. Darrouzet

Observations of natural waves close to magnetic equator inside plasmasphere by whisper/cluster.

18th General Assembly of International Union of Radio Science (URSI) 23-29 octobre 2005 New Delhi, India .

F. El-Lemdani Mazouz, .S Grimald, J.L. Rauch, P.M.E. Décréau, G. Bozan, G. Le Rouzic, X. Suraud, X Vallières, J. G Trotignon, P. Canu, F. Darrouzet

Electrostatic and electromagnetic emissions near the plasmasphere. A case event: 27 May 2003.

Cluster and Double Star Symposium – 5th Anniversary of Cluster in Space, Noordwijk, The Netherlands, 19 - 23 September 2005.

Farida EL-LEMDANI MAZOUZ

**Etude des émissions naturelles dans la plasmasphère,
reliées à la gyrofréquence électronique, à l'aide de
données de la mission multi satellite CLUSTER**

Cette thèse rassemble une série de travaux sur les émissions naturelles observées dans la partie externe de la plasmasphère terrestre par la mission multi-satellites CLUSTER, et plus précisément par l'instrument WHISPER. Parmi les émissions observées, citons les ondes électrostatiques électroniques observées entre deux gyrofréquences électroniques successives. Ces ondes sont couramment appelées $(n+1/2)f_{ce}$ et sont aussi bien observées dans la magnétosphère terrestre que dans celles d'autres planètes magnétisées. Nous proposons une classification de toutes les émissions naturelles observées dans la plasmasphère, basée sur les caractéristiques spectrales déterminées lors d'études d'événements. Nous nous intéresserons ensuite aux les trois types principaux d'ondes rencontrées : émissions aux $n(1.1)f_{ce}$, aux $(n+1/2)f_{ce}$ et aux nf_{ce} . Ces dernières, mises en évidence grâce à la bonne résolution de l'instrument WHISPER, n'avaient jamais été observées auparavant. Une étude systématique sur trois années de données (la période 2002 - 2004) a permis de localiser les différentes émissions observées en secteur MLT et en latitude magnétique. Par des études d'événements multi-satellites, et par l'étude statistique, nous avons pu mettre en évidence l'importance de la distance radiale à la plasmopause sur les caractéristiques (intensité, nombre d'harmoniques présentes) des émissions aux $(n+1/2)f_{ce}$ observées. Pour quantifier cette distance à la plasmopause, nous avons défini un indicateur utilisant la valeur de la fréquence plasma, mesurée par l'instrument WHISPER, lors de la traversée de l'équateur magnétique. Nous avons aussi étudié l'influence de l'activité géomagnétique, à travers les variations des indices AE, Kp et Dst, sur les trois types d'ondes étudiés. En examinant les données de l'instrument PEACE de la missions CLUSTER, deux formes différentes de la fonction de distribution, dépendant de l'intensité des ondes aux $(n+1/2)f_{ce}$, ont été mises en évidence. Enfin, nous nous sommes familiarisés avec l'utilisation d'un code particulière et avons retrouvé les modes propres du plasma prédits par la théorie linéaire.

Mots clefs : Magnétosphère terrestre, ondes électrostatiques électroniques, plasmasphère, CLUSTER

**Study of the natural emissions in the plasmasphere,
related to the electron gyrofrequency using CLUSTER
multi satellites data**

This dissertation gathers a series of investigations about natural emissions observed in the external part of the plasmasphere by CLUSTER multi satellite mission and more precisely by WHISPER instrument. Among the observed emissions, we can quote the electrostatic electron cyclotron harmonics, observed between two successive electron gyrofrequency. These waves are usually called $(n+1/2)f_{ce}$ emissions, they are observed in Earth's magnetosphere as well as in the vicinity of other planets. We propose a classification of the natural emissions observed in the plasmasphere, based on spectral characteristics. We focus on three principal types of waves: emissions at $n(1.1)f_{ce}$, at $(n+1/2)f_{ce}$, and at nf_{ce} . The last ones have been highlighted thanks to the good resolution of WHISPER instrument, they had never been observed before. A systematic study over three years of data (from 2002 - 2004) permit the localisation of the different emissions observed in MLT sector, and with magnetic latitude. Using multi satellite event studies and statistical study, we show the importance of the radial distance to the plasmopause on the characteristics features (intensity, number of harmonics) of the emissions at $(n+1/2)f_{ce}$. To characterize this distance to the plasmopause we define a proxy using the value of the equatorial plasma frequency, f_{peq} , measured by WHISPER instrument. We also studied the influence of the geomagnetic activity, through the variations of indices AE, Kp and Dst, on the three types of emissions observed. Some signatures on the electron distribution function have been examined. Two distinct forms of this distribution function, related to the intensity of the emissions at $(n+1/2)f_{ce}$, are observed. Finally, we present preliminary results of numerical simulations using a particle code and we find the eigen modes of the plasma predicted by the linear theory.

Keywords : Terrestrial magnetosphere, electron cyclotron harmonics waves, plasmasphere, CLUSTER

LPCE (Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement

3a avenue de la recherche scientifique

45071 orléans cedex 2