THÈSE PRÉSENTÉE A L'UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

Discipline : Physique

par

Fabien DARROUZET

Etude de la magnétosphère terrestre par l'analyse multipoint des données de la mission CLUSTER. Contributions à la caractérisation des frontières et de la magnétosphère interne

Soutenue le 7 Juin 2006

MEMBRES DU JURY :

Président :	M. Thierry DUDOK DE WIT, Professeur	Université d'Orléans
Rapporteurs :	M. Jean Claude CERISIER, Professeur	Université P. et M. Curie, Paris 6
	M. George K. PARKS, Professeur Emérite	Université de Berkeley
Directrice de thèse :	Mme Pierrette DÉCRÉAU, Maître de Conférences	Université d'Orléans
Encadrant de thèse :	M. Johan DE KEYSER, Chargé de Recherche	IASB, Bruxelles
Examinateurs :	M. Joseph F. LEMAIRE, Professeur Emérite	Université de Louvain-la-Neuve
	M. Iannis DANDOURAS, Chargé de Recherche	CESR, Toulouse

ETUDE DE LA MAGNÉTOSPHÈRE TERRESTRE PAR L'ANALYSE MULTIPOINT DES DONNÉES DE LA MISSION CLUSTER. CONTRIBUTIONS À LA CARACTÉRISATION DES FRONTIÈRES ET DE LA MAGNÉTOSPHÈRE INTERNE

Study of the terrestrial magnetosphere by multipoint data analysis with the CLUSTER mission. Contributions to the characterization of boundary layers and of the inner magnetosphere

Fabien DARROUZET

Fabien DARROUZET

Etude de la magnétosphère terrestre par l'analyse multipoint des données de la mission CLUSTER. Contributions à la caractérisation des frontières et de la magnétosphère interne

xix+248 p.

Impression : these.tex – 1/9/2006 – 20:13

Résumé

CLUSTER est la première mission spatiale permettant l'étude à trois dimensions de la magnétosphère terrestre. Son orbite polaire et sa configuration de quatre satellites en tétraèdre lui permettent d'effectuer des mesures in situ dans plusieurs régions de la magnétosphère, notamment dans la plasmasphère. Cette thèse rassemble une série de travaux sur les structures de plasma rencontrées sur l'orbite de CLUSTER durant la période 2001-2004. La quantité physique étudiée est essentiellement la densité électronique, mais aussi le champ magnétique continu. Dans une première partie, deux outils d'analyse multipoints, le gradient spatial et la méthode des délais, sont décrits, testés et discutés sur des jeux de données synthétiques, puis sur des données réelles, pour diverses situations typiques. Dans le cadre de conditions favorables, ces analyses révèlent le mouvement, l'orientation de frontières, ainsi que les dimensions des structures rencontrées, impossibles à estimer par une mission composée d'un seul satellite. Une seconde partie s'intéresse plus globalement à la plasmasphère, notamment à la topologie et à la dynamique de ses structures de densité à petite et grande échelle. Cette étude s'appuie sur les analyses multipoints vues précédemment, mais elle utilise également des données d'autres instruments de CLUSTER, des images globales de la plasmasphère fournies par la mission IMAGE, ainsi que des résultats d'études statistiques et de simulations numériques. Enfin, la thèse décrit une analyse statistique menée sur un autre jeu de données: les densités de puissance spectrales des ondes électromagnétiques mesurées à basse altitude par le satellite Viking durant l'année 1986.

Abstract

CLUSTER is the first space mission dedicated to the three-dimensional study of the terrestrial magnetosphere. Its polar orbit and four spacecraft tetrahedron formation allow it to make in situ measurements in various regions of the magnetosphere, in particular in the plasmasphere. This PhD thesis brings together several studies on plasma structures encountered by the CLUSTER spacecraft along their orbit, during the time period 2001-2004. The physical quantity analysed here is mainly the electronic density, but also the DC magnetic field. In a first part of the thesis, two multipoint analysis tools, the spatial gradient and the time delay, are described, tested - using synthetic datasets then real data - and discussed for typical situations. When conditions are favourable, these analyses reveal the boundary motion and orientation, as well as the dimensions of the structures encountered, impossible to estimate with a single satellite mission. Another part of the thesis deals more globally with the plasmasphere, focusing particularly on the topology and dynamics of small- and large-scale density structures. This study is based on the multipoint analyses previously introduced. It also presents and discusses datasets from other CLUSTER instruments, global images of the plasmasphere from the IMAGE mission, and results from statistical studies and numerical simulations. Finally, the thesis describes a statistical study based on another dataset: the power spectral densities of electromagnetic waves measured at low altitude by the Viking spacecraft in 1986.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mes parents, MONIQUE et ANDRÉ, qui m'ont toujours soutenu pour que je puisse faire ce que je désirais, y compris durant les 15 mois de chômage qui ont suivi mon DEA... Et finalement, ils n'ont pas eu tort !!! Merci aussi à ma soeur EMMANUELLE et sa petite famille, AZIZ, CAMILLE, NAHEL, ainsi qu'à mon frère CYRIL.

Je remercie tout particulièrement PIERRETTE, qui a accepté d'être ma directrice de thèse, alors que ce n'était pas gagné, et qui m'a beaucoup soutenu et encouragé tout au long de ces années. Un grand merci également à JOHAN, mon encadrant de thèse, qui n'a jamais renoncé à m'expliquer et discuter encore et encore, malgré les difficultés rencontrées au quotidien...

Merci à GEORGE PARKS et JEAN CLAUDE CERISIER, qui ont accepté d'être les rapporteurs de ma thèse, à IANNIS DANDOURAS, qui malgré l'impossibilité administrative d'être rapporteur a participé au jury, et à THIERRY DUDOK DE WIT qui a dirigé la soutenance de cette thèse.

Un grand merci scientifique et humain à JOSEPH, qui m'a embauché à l'IASB et qui m'a soutenu et suivi dans mon travail depuis mes débuts à l'institut, et à MICHEL, qui l'a remplacé en tant que responsable et qui a fait en sorte que je puisse rester à l'IASB. Merci aux équipes des instruments EFW, EDI, FGM, EUV, V4H, MPA, dont j'ai utilisé les données dans cette thèse.

Dans ce travail de recherche, il y a bien sur les conférences, mais aussi les prolongations de conférence, et je remercie donc les compagnons de vol, JENNY, JEAN FRANÇOIS, SANDRINE, FARIDA, CLAIRE, ARNAUD, TOBIA, BENOIT, LUCA, CHRISTINA. Je n'oublie pas mes collègues de l'IASB, VIVIANE, HERVÉ, MARIUS, SIMON, QUENTIN, mes voisins de bureau VLADIMIR, MICHEL, PAUL, et la bande à CORINNE!!

Des remerciements un peu plus solennels pour les deux directeurs qui se sont succédés à l'IASB, qui m'a accueilli il y a maintenant 7 ans et demi, PAUL SIMON et NOËL PARMENTIER.

Merci à celles et ceux qui m'ont cité dans leurs remerciements de thèse, JEAN CHARLES (bravo, tu étais le premier!!), TRUDE (merci de m'avoir permis de voir de magnifiques aurores en Norvège), FRÉDO (merci pour l'initiation à LaTeX), MANU (bravo, tu as fini avant moi!!).

Je n'oublie pas mes amis de longue date, de mes débuts à l'Université de Nantes, DAVID, PATRICE, LIONEL et de mes premiers pas dans la ville de Nantes, SERVANE, FRÉDOTTE, SOIZICK, FRANCK, ROMAIN, JACK. Et maintenant, quelques remerciements divers et variés à des amis de Paris, Bruxelles ou ailleurs, HANNA, SÉBASTIEN, FRED, KENNETH, EDDY, ERWAN.

Et je remercie FABRICE, pour son soutien durant les derniers jours d'écriture (désolé, on n'a pas vraiment eu le temps de faire une petite partie d'échec), et durant les premiers jours de mon arrivée à Bruxelles (bravo, tu détiens le record de la personne qui m'a le plus rendu visite!!).

Merci beaucoup à ma chère ZOÉ, qui m'a soutenu tout le long de ces derniers mois alors que j'étais assez souvent insupportable, ZOÉ que j'ai rencontrée il y a un peu plus d'1 an grâce à un ancien collègue de l'IASB (merci HERVÉ!!), et merci notamment pour ces délicieux paniers repas que tu m'apportais au bureau le soir durant les derniers jours de rédaction...

Et je finirai par remercier toutes les personnes que j'ai justement oublié de remercier, et qui j'espère ne m'en voudront pas trop...

Sommaire

Résumé ..... **v**
Abstract ..... **vii**
Introduction **1**

I Contexte Général

1 La Magnétosphère Terrestre **7**
2 La Mission CLUSTER **13**
3 Autres Missions **23**
4 Simulations Numériques de Formation de la Plasmapause **29**

II Outils d'Analyse

5 Généralités **35**
6 Gradient Spatial **39**
7 Méthode des Délais **59**
8 Analyse Statistique **67**

III Plasmasphère

9 Contexte Général **77**
10 Etude Statistique **79**
11 Structure Globale de la Plasmasphère **87**
12 Structure de Densité à Petite Echelle **97**
13 Panaches Plasmasphériques **101**
Conclusions Générales **134**
Annexes **145**
A Coordonnées et Paramètres **147**
B Densité de Courant Electrique **151**
C Projection dans le Plan Equatorial Magnétique **153**
D Vecteurs Vitesses dans le Plan Equatorial **155**
E Articles Publiés **159**

Bibliographie **207**
Table des Figures **225**
Liste des Tableaux **229**

Table des Matières 231
Publications et Communications 235

Introduction

La magnétosphère terrestre est une cavité globalement modelée par le champ magnétique de la Terre et modifiée par le vent solaire. En effet, elle s'étend du côté du Soleil jusqu'à une dizaine de rayons terrestres (1 R_E = 6371 km), alors qu'une queue magnétique est étirée sur plusieurs centaines de rayons terrestres du côté opposé au Soleil. A l'extérieur de la magnétosphère se trouve la magnétogaine, séparée de celle-ci par la magnétopause. Entre le vent solaire et la magnétogaine, une onde de choc se crée et cela forme une frontière appellée le choc d'étrave. A la limite inférieure de la magnétosphère se trouve l'ionosphère. De nombreuses sous-régions composent la magnétosphère, comme les cornets polaires, les zones aurorales, la plasmasphère, le feuillet de plasma, ou les lobes.

Parmi ces régions, la plasmasphère est de forme toroïdale et peuplée de plasma froid d'origine principalement ionosphérique: des électrons et des ions positifs (90 % de protons H^+, moins de 10 % d'hélium He^+, de l'oxygène O^+, ainsi que quelques traces d'ions plus lourds). Elle s'étend en moyenne jusqu'à des distances équatoriales d'environ $4 - 5$ R_E. Cependant, cette extension radiale varie en fonction de l'activité géomagnétique. En effet, dans le cas d'une forte augmentation de cette activité, sa frontière extérieure, la plasmapause, peut se situer à 2 R_E, ou au contraire s'étendre au-delà de $7 - 8$ R_E lors de longues périodes d'accalmie géomagnétique. Ces variations d'activité perturbent également la structure à petite et moyenne échelle de la plasmasphère. Ainsi, des panaches plasmasphériques reliés à la plasmasphère peuvent se former et tourner avec celle-ci. Par ailleurs, la plasmapause peut être parsemée de structures de densité à petites échelles, d'où le nouveau nom décrivant cette région: la couche frontière de plasmasphère.

Depuis de nombreuses années, la magnétosphère a été étudiée par différents moyens: des analyses théoriques, des simulations numériques, des mesures à bord de satellites scientifiques ou à partir de stations de mesures au sol. Cependant, il est parfois difficile d'analyser correctement une structure, une frontière ou une situation donnée avec un seul moyen de mesure. Ainsi, des efforts ont été faits pour combiner plusieurs satellites, ou des mesures effectuées dans l'espace et au sol. Malgré ces efforts, les scientifiques ont réalisé que cela n'était pas suffisant en raison de problèmes de conjonctions de mesures, ou de compatibilité d'instruments. Ainsi une mission multi-satellites fut décidée conjointement par plusieurs agences spatiales internationales: la mission CLUSTER.

Après un premier échec dû à l'explosion de son lanceur Ariane-5, la mission CLUSTER fut reconstruite et lancée à nouveau durant l'été 2000. C'est la première mission permettant l'étude à trois dimensions de la magnétosphère terrestre et du vent solaire proche. Elle utilise une formation de quatre satellites comprenant chacun une charge scientifique identique de onze instruments mesurant champs, ondes et particules. Son orbite polaire, avec un apogée à 19.6 rayons terrestres (R_E) et un périgée à 4 R_E, lui permet d'effectuer des mesures in situ dans des régions aussi diverses que le vent solaire, la magnétogaine et l'ensemble des régions composant la magnétosphère. Cette mission a pour but d'étudier les caractéristiques spatiales et temporelles du plasma magnétosphérique à petite et grande échelle, grâce à une distance de séparation entre les satellites variant de 100 à 20000 km au cours de plus de cinq années de mission.

Les possibilités de corrélation entre les différents satellites peuvent varier considérablement en fonction de plusieurs paramètres: la configuration du tétraèdre formé par les satellites, le rapport entre la distance de séparation entre les satellites et la taille caractéristique de la structure

analysée, ainsi que le rapport entre l'intervalle de temps qui sépare le passage des satellites à travers la structure et le temps caractéristique pendant lequel cette même structure reste quasi-stationnaire. Ainsi, dans le cas d'une forte corrélation spatiale (distance de séparation inférieure à la taille caractéristique), il est possible d'utiliser une technique d'analyse à quatre points, telle que la détermination des trois composantes du gradient spatial d'une quantité physique scalaire ou du rotationnel d'un champ vectoriel. Cet outil doit cependant être utilisé avec précaution, en raison des erreurs sur le calcul du gradient et des différentes configurations dans l'espace des quatre satellites. Par ailleurs, dans le cas d'une bonne corrélation temporelle (intervalle de temps inférieur au temps caractéristique), la vitesse normale d'une frontière supposée plane est déterminée à partir des différences de temps de traversée de cette frontière par les quatre satellites et de leurs positions respectives. En effectuant des hypothèses supplémentaires, une méthode de reconstruction de frontière est alors applicable. Enfin, dans le cas d'une faible corrélation, temporelle et/ou spatiale, une étude statistique à grande échelle peut être effectuée: bien que permettant un meilleur échantillonnage d'une région et de conditions géophysiques données, la présence de quatre satellites n'offre pas d'information supplémentaire déterminante dans ce cas. L'ensemble de ces outils d'analyse multipoints est appliqué à différentes régions de la magnétosphère en fonction des critères établis précédemment.

La Partie I est consacrée à la présentation du contexte général de cette thèse, c'est-à-dire la magnétosphère terrestre, la mission CLUSTER ainsi que les autres missions et les simulations numériques utilisées dans cette étude.

Les outils d'analyse sont présentés dans la Partie II, avec une description générale des analyses multipoints, puis la présentation des trois outils utilisés dans cette thèse: le gradient spatial et la méthode des délais (outils multipoints) puis l'analyse statistique. Dans chaque chapitre, ces techniques d'analyse seront appliquées à des données scientifiques, notamment pour en tester les limites. Ainsi, la méthode du gradient spatial est utilisée pour analyser l'orientation et le déplacement d'ondulations de plasma à grande échelle dans la magnétogaine, ou la direction normale de la magnétopause. La méthode des délais permet d'étudier l'orientation et le mouvement de la magnétopause. Enfin, une étude statistique des ondes à très basses fréquences (VLF) est réalisée dans les régions aurorales à l'aide des observations de la mission Viking.

La Partie III présente une étude de la plasmasphère sous différents aspects. Tout d'abord, deux analyses statistiques sont effectuées, la première concernant la plasmapause, et la seconde les structures de densité à petite échelle observées dans la plasmasphère. Ensuite, la structure globale de la plasmasphère est examinée en étudiant le gradient spatial de la densité et de la magnitude du champ magnétique. Le chapitre suivant est consacré à l'analyse d'une structure de densité à petite échelle, afin d'essayer de déterminer son orientation et son mouvement. Enfin, les panaches plasmasphériques sont analysés en détail, afin d'étudier notamment leur structure et leur mouvement. Ce travail est effectué en utilisant différents jeux de données: des mesures in situ, des images globales et des simulations numériques.

Enfin, des conclusions générales sont avancées, tout d'abord sur les outils d'analyse multipoints, puis sur l'étude effectuée dans la plasmasphère.

PARTIE I

Contexte Général

Cette thèse a pour but d'étudier la magnétosphère terrestre en utilisant principalement des outils d'analyse multipoints que nous allons appliquer aux données de la mission multi-satellites CLUSTER. Nous allons donc présenter le contexte général de ce travail dans les Chapitres 1 à 4 de la manière suivante: la magnétosphère dans le Chapitre 1, la mission CLUSTER et ses instruments de mesure dans le Chapitre 2, les autres missions scientifiques utilisées dans cette étude dans le Chapitre 3 et enfin des simulations numériques dans le Chapitre 4.

CHAPITRE 1

La Magnétosphère Terrestre

1.1 Généralités

La Terre est une planète qui possède un champ magnétique interne puissant. En l'absence de perturbations extérieures, le champ magnétique terrestre d'origine interne peut être vu en première approximation comme un dipôle ayant un axe incliné d'environ 12° par rapport à l'axe de rotation (Figure 1.1). Le champ magnétique pointe en direction de la surface de la Terre dans l'hémisphère Nord, et vers l'espace dans l'hémisphère Sud. Sa magnitude à la surface de la Terre est de l'ordre de 50 μT à l'équateur.

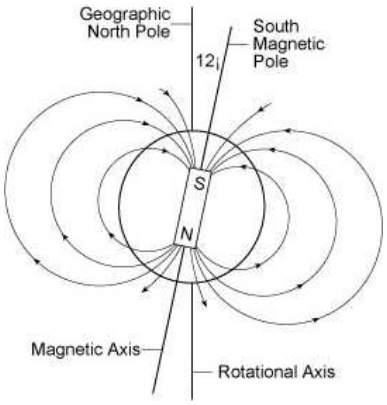

Figure 1.1: *Champ magnétique de la Terre en l'absence de perturbations extérieures, assimilé à un dipôle incliné d'environ 12° par rapport à l'axe de rotation (D'après Lang [2003]).*

Le milieu interplanétaire est balayé en permanence par un vent de particules électriquement chargées en provenance du Soleil. Ce vent, baptisé vent solaire par Parker [1958], est très peu dense (5 cm^{-3}), mais très rapide (400 à 800 km/s). Il est composé principalement d'électrons et de protons H^+, d'une petite quantité d'hélium He^{++} et de traces d'ions plus lourds. Le vent solaire modifie le champ magnétique de la Terre, créant une cavité appelée magnétosphère (baptisée ainsi par Gold [1959]). Sous l'influence du vent solaire et du champ magnétique qu'il transporte (le champ magnétique interplanétaire, ou IMF[1]), la magnétosphère est comprimée

[1] Anglais: Interplanetary Magnetic Field

du côté du Soleil, appelé côté jour, mais très étendue dans la direction anti-solaire, appelée côté nuit (Figure 1.2). En conséquence, la distance entre la frontière extérieure de la magnétosphère et la Terre est d'environ 10 rayons terrestres (1 R_E = 6371 km) du côté jour, alors qu'une queue magnétique s'étendant sur plusieurs centaines de rayons terrestres se forme du côté nuit [Ness, 1965].

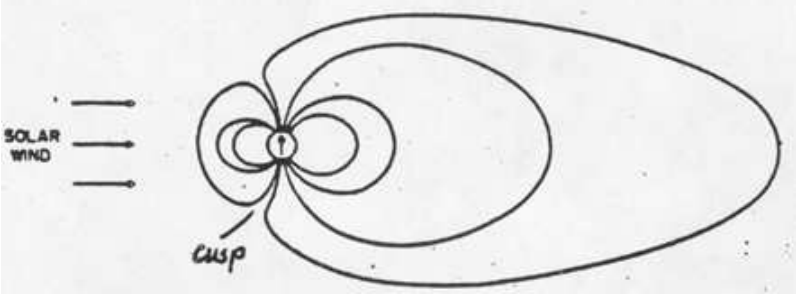

Figure 1.2: *Champ magnétique de la Terre modifié en raison de l'intéraction avec le vent solaire (D'après Prof. R. H. Holzworth,* `http://earthweb.ess.washington.edu/bobholz/ess515/`*).*

La magnétosphère ainsi que l'ensemble des différentes régions la composant, est schématisée sur la Figure 1.3. Le vent solaire est un vent supersonique (il se déplace plus vite que les ondes sonores et que les ondes d'Alfvén présentes dans le plasma), et lorsqu'il rencontre un obstacle (la magnétosphère de la Terre par exemple), il se crée en amont de l'obstacle une frontière au travers de laquelle la vitesse du vent solaire deveint brutalement inférieure à la vitesse de l'onde: c'est le choc d'étrave, que l'on trouve en amont de la magnétosphère terrestre.

La frontière extérieure de la magnétosphère est appelée la magnétopause. La région située entre le choc et la magnétopause s'appelle la magnétogaine. Les zones aurorales constituent deux régions circulaires autour des pôles Nord et Sud, où l'on observe communément les aurores polaires. La queue de la magnétosphère est formée des lobes et du feuillet de plasma. Dans la magnétosphère intérieure, on trouve notamment la plasmasphère. A la limite inférieure de la magnétosphère se situe l'ionosphère. Ainsi, la magnétosphère est constituée de plasma provenant à la fois de l'ionosphère et du vent solaire, et sa dynamique est contrôlée par le champ magnétique de la Terre. Notre étude porte sur certaines régions et frontières de la magnétosphère terrestre, régions dont nous allons donner une présentation plus détaillée dans les paragraphes suivants.

1.2 La magnétogaine et la magnétopause

La magnétopause est la frontière entre la magnétosphère, dominée par le champ magnétique de la Terre, et le milieu interplanétaire, dominé par le vent solaire (voir la revue de Russell [2003]). Son existence fut introduite pour la première fois par Chapman et Ferraro [1931]. La magnétopause est une frontière relativement étanche en ce sens qu'elle empêche la majeure partie du vent solaire de pénétrer dans l'environnement de la planète. La magnétogaine est une

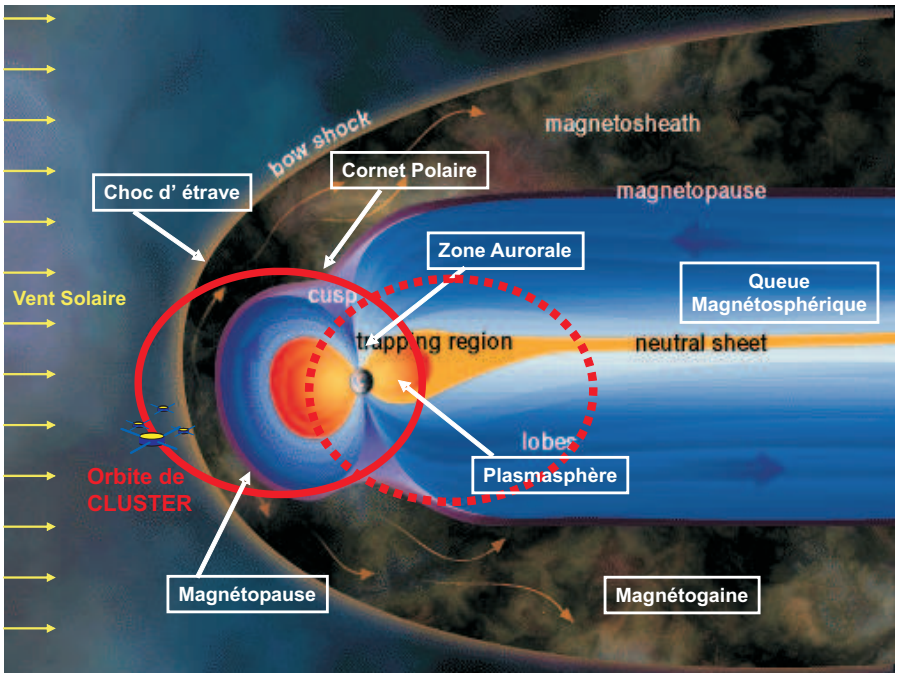

Figure 1.3: *Magnétosphère de la Terre, avec les principales régions qui la composent (D'après ESA).*

région au voisinage de la magnétosphère, située entre le choc et la magnétopause (voir Figure 1.3). C'est là que le vent solaire s'écoule, principalement, en contournant la magnétosphère, après avoir été ralenti et chauffé au travers du choc. Le plasma y est plus dense que dans le vent solaire en amont du choc. C'est une région où le plasma est turbulent, on y mesure une grande agitation électromagnétique.

La magnétopause joue un rôle important en physique spatiale, étant donné que le couplage entre le vent solaire et la magnétosphère se fait à travers elle. Il faut noter que la magnétosphère n'est pas une structure statique: elle est en mouvement constant. D'une part, l'orientation du dipôle magnétique de la Terre change avec la rotation quotidienne de celle-ci et avec sa révolution annuelle autour du Soleil. D'autre part, le vent solaire se caractérise par une forte variabilité temporelle sur des échelles de temps allant de quelques secondes à plusieurs années. Les dimensions et les formes de ces régions peuvent changer dans le temps en raison de la variabilité naturelle. Par exemple, quand la matière d'une éruption de la couronne solaire (une éjection de masse coronale, ou CME[2]) se propage à travers l'espace interplanétaire et atteint la Terre, la pression dynamique du vent solaire est fortement augmentée, de telle sorte que la magnétopause est poussée vers la Terre. Un des effets des fluctuations mineures continues de la pression dynamique du vent solaire est le mouvement d'oscillation de la magnétopause: celle-ci oscille afin de rétablir l'équilibre entre la pression magnétosphérique et la pression du vent solaire. Le mouvement de cette frontière peut également être induit par des instabilités de plasma, telles que l'instabilité de Kelvin-Helmholtz [Sckopke et al., 1981; Fitzenreiter et

[2] Anglais: Coronal Mass Ejection

Ogilvie, 1995; Owen et al., 2004; Hasegawa et al., 2004a]. Des fluctuations spatio-temporelles sont également connues pour rendre la magnétopause semi-perméable, et permettre au plasma de la magnétogaine de la traverser, formant donc la couche frontière magnétosphérique. Divers mécanismes permettent ce transfert de matière, tels que la reconnection magnétique [Dungey, 1961; Lee, 1995], ou la pénétration impulsive d'éléments de plasma [Lemaire, 1977; Lemaire et Roth, 1978, 1991; Echim et Lemaire, 2000].

1.3 Les zones aurorales

Les zones aurorales constituent deux régions circulaires autour des pôles magnétiques Nord et Sud, où l'on observe communément des aurores polaires (Figure 1.4). Leur position géographique a été déterminée pour la première fois par E. Loumis en 1960, à partir d'une étude statistique des observations d'aurores dans l'hémisphère Nord. Ces émissions de lumière résultent de la luminescence de la haute atmosphère due à la désexcitation des molécules de l'atmosphère. Les molécules sont préalablement excitées par des électrons énergétiques provenant de la magnétosphère et précipités vers l'atmosphère.

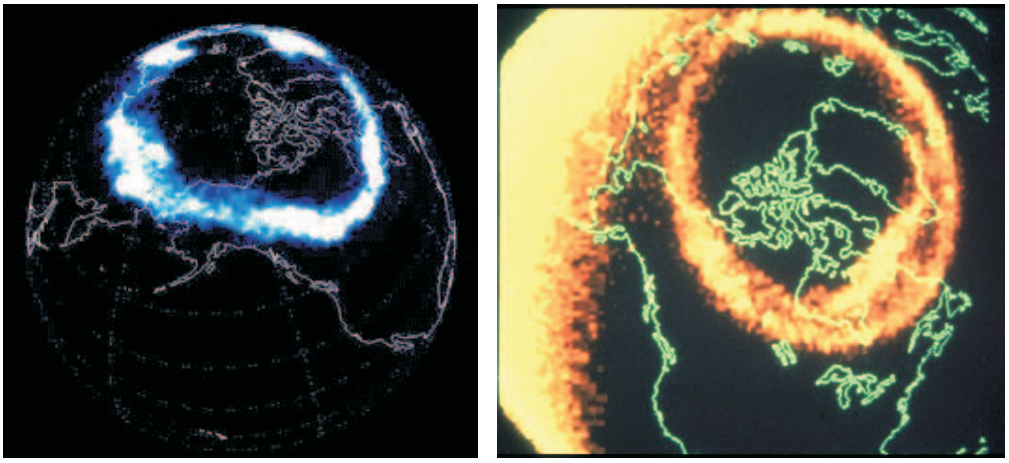

Figure 1.4: *Ovale auroral dans l'hémisphère Nord, observé par le satellite IMAGE (panneau de gauche), et par le satellite Polar (panneau de droite) (D'après NASA).*

Cette région est également d'un grand intérêt en raison des différents types d'ondes que l'on y observe, dans la gamme des ultra basses fréquences, ou ULF[3] [Perraut et al., 1998], mais également dans la gamme des très basses fréquences, ou VLF[4]. Elles sont principalement électrostatiques, mais certaines études ont montré également l'existence d'ondes électromagnétiques [Gustafsson et al., 1990]. Ces ondes jouent un rôle très important dans les zones aurorales, et peuvent être utilisées pour caractériser le niveau d'activité dans cette région de la magnétosphère. Ainsi, à moyennes latitudes, les ondes VLF sont connues pour disperser les

[3] Anglais: Ultra Low Frequency
[4] Anglais: Very Low Frequency

électrons énergétiques piégés, et éventuellement les précipiter dans l'atmosphère de la Terre, où ils peuvent altérer la propagation des ondes radios.

1.4 La plasmasphère et la plasmapause

La magnétosphère interne comporte notamment la plasmasphère (Figure 1.5), qui est une région toroïdale entourant la Terre, peuplée par du plasma froid (quelques eV ou moins) d'origine principalement ionosphérique (voir la monographie de Lemaire et Gringauz [1998] et la revue de Ganguli et al. [2000]). En comparaison avec d'autres régions de la magnétosphère, la densité de la plasmasphère est assez importante (de 10 à 10^4 cm^{-3}). Elle est composée d'électrons et d'ions positifs: des protons H^+ ($\sim$ 90%), mais aussi de l'hélium He^+, de l'oxygène O^+ et quelques traces d'ions plus lourds. Ce plasma est principalement d'origine ionosphérique, et durant les périodes de faible activité géomagnétique, un processus de remplissage depuis les couches supérieures de l'ionosphère permet au plasma de remonter le long des lignes de champ magnétique et ainsi de remplir la plasmasphère. Ce mécanisme n'a pas encore été complètement élucidé et fait l'objet de nombreuses études actuellement.

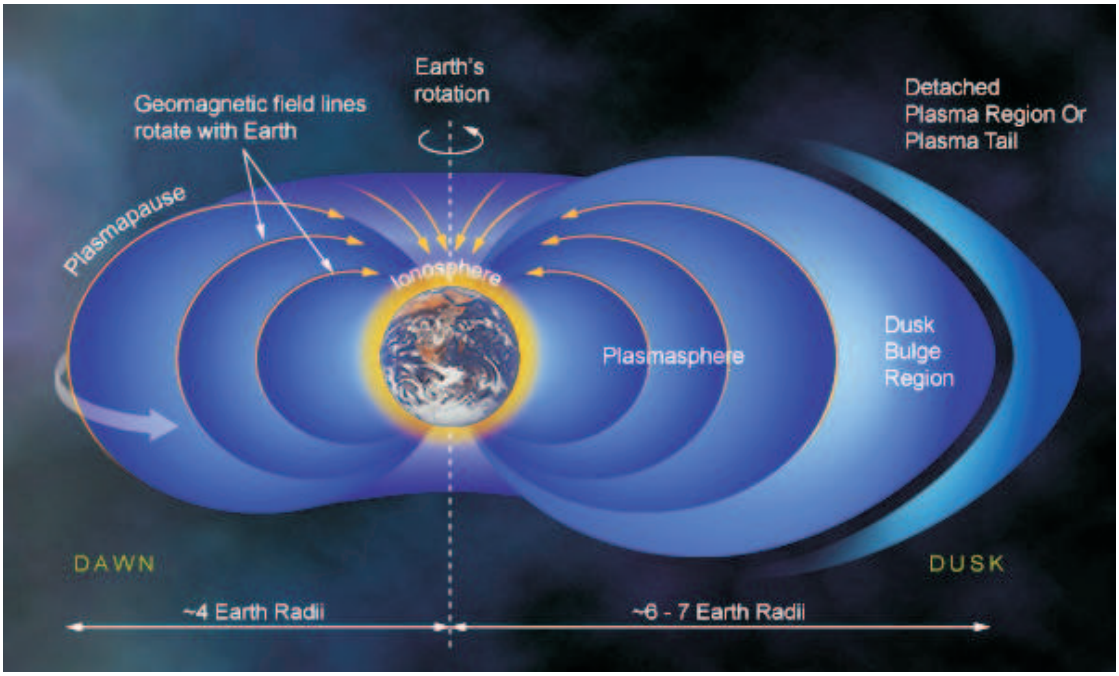

Figure 1.5: *Vue générale de la plasmasphère (D'après "Windows to the Universe",* `http://www.windows.ucar.edu`*).*

La frontière extérieure de la plasmasphère a été découverte simultanément à partir d'observations au sol de sifflements [Carpenter, 1963], et à partir de mesures à bord de satellites [Gringauz, 1963]; elle fut intitulée plasmapause pour la première fois par D. Carpenter en 1966 [Carpenter, 1966]. Elle est caractérisée, sous sa forme la plus simple, par une brutale chute de

la densité de plasma de plusieurs ordres de grandeur. De forme approchant celle d'une coquille magnétique, cette frontière peut se situer à l'équateur à une distance radiale comprise entre 2 et 8 R_E en fonction de l'intensité de l'activité géomagnétique. La plasmasphère occupe en effet une région d'autant plus étendue que l'activité géomagnétique est faible. La plasmapause n'est pas toujours une frontière nette, la chute de densité peut être très irrégulière et se produire sur un intervalle important de distances géocentriques. Carpenter et Lemaire [2004] ont introduit récemment la notion de "couche frontière de plasmasphère", ou PBL[5], frontière épaisse qui recouvre l'ensemble des régions où se produit la chute de densité, soit en gros entre 10^3 et 10 cm^{-3}. Enfin, la plasmasphère possède une extension du côté crépuscule, c'est-à-dire dans le secteur de temps local (LT[6]) compris entre 16 et 20 heures [Carpenter, 1966; Chappell et al., 1970a], mais également un renflement du côté jour, c'est-à-dire autour de midi temps local [Bezrukikh et Gringauz, 1976].

D'autres types de structures, connectées à la plasmasphère, s'étendent vers l'extérieur. Elles ont été appelées dans le passé "queues plasmasphériques"[7] [Taylor et al., 1971], ou peut-être également "éléments de plasma détachés"[8] [Chappell, 1974]. Elles sont maintenant connues sous le nom de "plasmaspheric plumes" en Anglais (voir par exemple Elphic et al. [1996]; Ober et al. [1997]; Sandel et al. [2001]), expression que l'on peut traduire en Français par "panaches plasmasphériques". Ces structures ont été fréquemment observées par des mesures faites à bord de satellites, tels que OGO 5 [Chappell et al., 1970b], ISEE [Carpenter et Anderson, 1992], LANL [Moldwin et al., 1995], CRRES [Moldwin et al., 2004], mais aussi par des mesures effectuées au sol [Carpenter et al., 1992, 1993; Foster et al., 2002]. Plus récemment, ces panaches ont été observés très fréquemment sur des images globales de la plasmasphère prises par l'imageur EUV (Extreme Ultraviolet) à bord du satellite IMAGE [Sandel et al., 2001; Garcia et al., 2003; Sandel et al., 2003; Goldstein et al., 2004; Goldstein et Sandel, 2005; Spasojević et al., 2003, 2004]. Des panaches plasmasphériques ont également été identifiés par des mesures in situ faites par la mission CLUSTER composée de quatre satellites identiques [Darrouzet et al., 2004, 2006a; Décréau et al., 2004, 2005; Dandouras et al., 2005].

[5] Anglais: Plasmasphere Boundary Layer
[6] Anglais: Local Time
[7] Anglais: Plasmaspheric tails
[8] Anglais: Detached plasma elements

CHAPITRE 2

La Mission CLUSTER

2.1 Généralités

CLUSTER est une des deux missions constituant le Solar Terrestrial Science Program (STSP) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA[1]), l'autre étant SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory). C'est la première mission spatiale permettant l'étude à trois dimensions de la magnétosphère terrestre et du vent solaire proche. CLUSTER utilise une formation de quatre satellites comprenant chacun une charge scientifique identique de onze instruments mesurant champs, ondes et particules. Ceux-ci effectuent des mesures de quantités scalaires et vectorielles à haute résolution temporelle et instrumentale [Escoubet et al., 1997]. Quatre ans après l'échec du premier vol de la fusée Ariane-5 qui devait mettre en orbite les quatre satellites CLUSTER (le 4 Juin 1986), ceux-ci furent reconstruits à l'identique et furent lancés par paires à l'aide de deux fusées Russes Soyouz-Fregat depuis le cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan, le 16 Juillet 2000, puis le 9 Août 2000 (Figure 2.1).

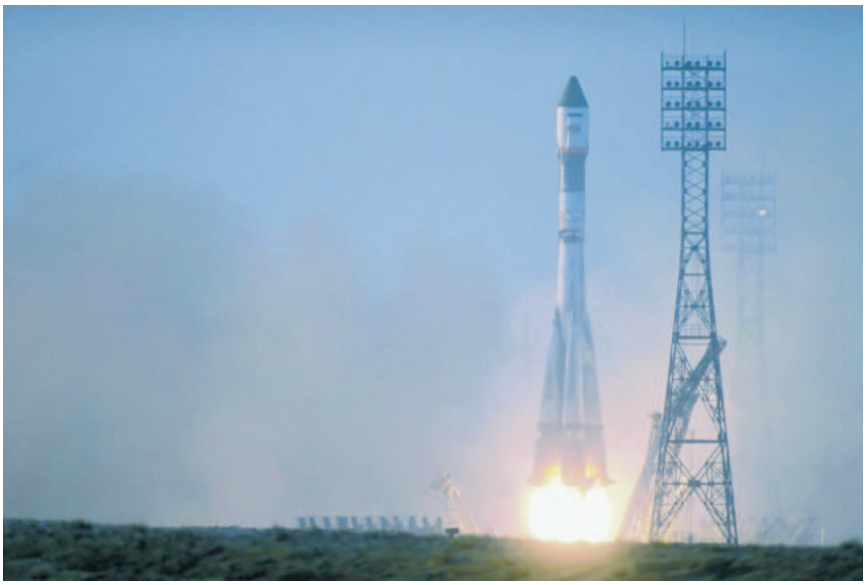

Figure 2.1: *Lancement des deux premiers satellites CLUSTER par la fusée Russe Soyouz-Fregat le 16 Juillet 2000 (D'après ESA).*

[1] Anglais: European Space Agency

Leur orbite polaire, avec un apogée à 19.6 R_E, un périgée à 4 R_E et une période de 57 heures, leur permet d'effectuer des mesures in situ dans des régions aussi diverses que le vent solaire, la magnétogaine et le choc d'étrave, la magnétopause, les cornets polaires, la plasmasphère et la plasmapause, la queue, ou le feuillet de plasma (voir localisation de ces régions sur la Figure 1.3). Cette mission a pour but d'étudier les caractéristiques spatiales et temporelles du plasma magnétosphérique à petite et grande échelle, mais également les différentes ondes se propageant dans ce milieu.

2.2 Distance de séparation entre les satellites et configuration du tétraèdre

En raison de la grande variété des régions composant l'environnement terrestre, la distance de séparation entre les quatre satellites a été choisie variable. Ainsi, durant les 9 années désormais prévues pour cette mission (jusqu'à fin 2009), cette distance de séparation varie entre 100 et 20000 km et est modifiée tous les 6 ou 12 mois (voir Figure 2.2).

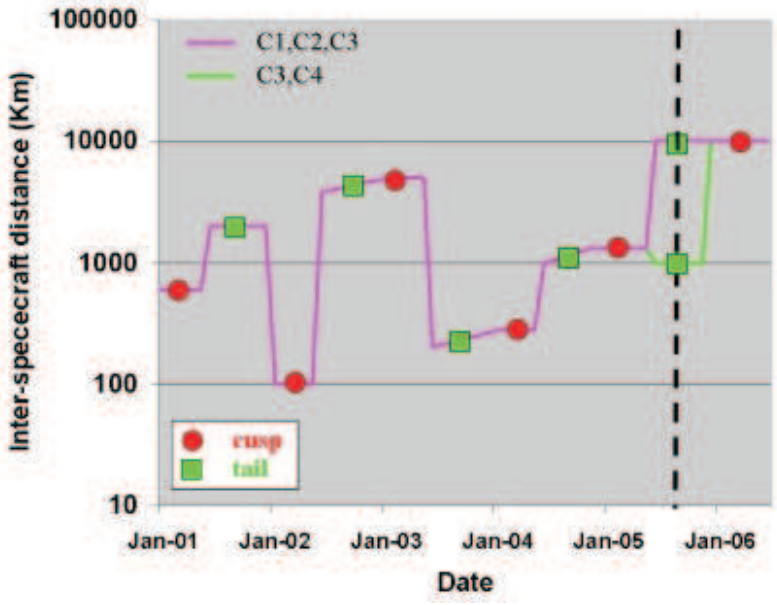

Figure 2.2: *Distance de séparation moyenne entre les quatre satellites CLUSTER depuis le début de la mission en Janvier 2001, jusqu'en Juin 2006 (D'après ESA).*

La comparaison de cette distance de séparation entre les satellites avec la taille caractéristique de la structure analysée permet ou non d'effectuer une analyse multipoint. Ainsi, dans le cas d'une forte corrélation spatiale (distance de séparation inférieure à la taille caractéristique), il est possible d'utiliser une technique d'analyse à quatre points, telle que la détermination des trois composantes du gradient spatial d'une quantité physique scalaire ou du rotationnel d'un champ vectoriel. Cette technique et ses limitations sont décrites dans le Chapitre 6. Par contre,

dans le cas d'une faible corrélation spatiale, une étude statistique à grande échelle peut être effectuée (voir Chapitre 8), car la présence de quatre satellites n'offre pas d'information supplémentaire déterminante dans ce cas.

Par ailleurs, la configuration du tétraèdre formé par les quatre satellites varie le long de l'orbite en conséquence de la légère différence d'orbites entre les satellites: elle est donc différente suivant les régions traversées. Ainsi, la constellation configurée sous forme de tétraèdre est en général régulière dans la région du cornet polaire dans le cas d'une orbite avec l'apogée du côté jour (Figure 2.3a), et dans la queue magnétosphérique dans le cas d'une orbite avec l'apogée du côté nuit (Figure 2.3b). Dans tous les cas, lors de traversées de la plasmasphère, le tétraèdre devient plus allongé. Cette configuration permet ou non de faire des analyses multipoints en fonction des événements étudiés, ce que nous développerons plus en détail dans la Partie II.

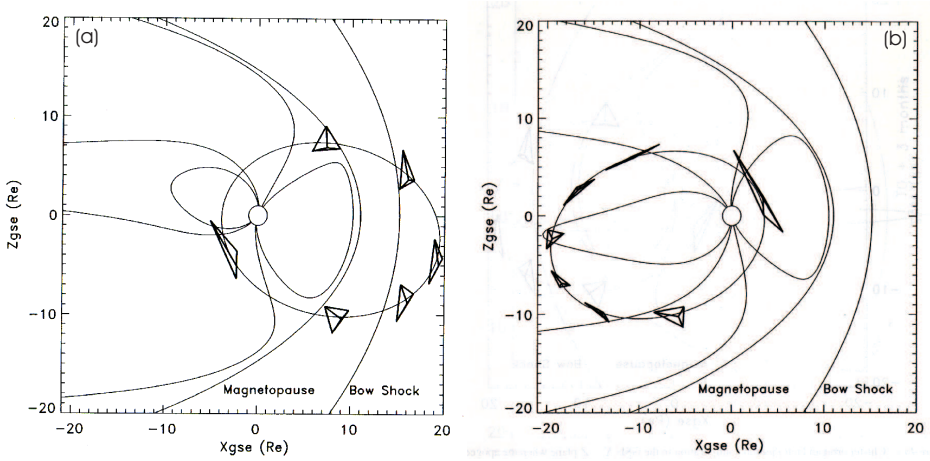

Figure 2.3: *Projection dans le plan XZ du système de référence GSE (voir Annexe A) de l'orbite de CLUSTER dans le cas où l'apogée est (a) dans le vent solaire (côté jour), (b) dans la queue magnétosphérique (côté nuit), avec la configuration du tétraèdre le long de cette orbite (D'après ESA).*

Le rapport entre l'intervalle de temps entre le passage des satellites à travers une structure et la durée de vie caractéristique de cette même structure a également une importance pour déterminer le type d'analyse à effectuer. Ainsi, dans le cas d'une bonne corrélation temporelle (intervalle de temps inférieur à la durée caractéristique), la vitesse normale d'une frontière pourra être déterminée à partir des différences de temps de traversée de cette frontière par les quatre satellites et de leurs positions respectives. Plus de détails sur cette technique d'analyse sont donnés dans le Chapitre 7, notamment sur les contraintes spatiales à respecter. En effectuant des hypothèses supplémentaires, une méthode de reconstruction de frontière peut être appliquée. Cette méthode est décrite dans le Paragraphe 5.2. Enfin, la précession de l'orbite permet de couvrir en une année les différents temps locaux LT, par exemple au périgée: 00:00 LT en Mars, 06:00 LT en Juin, 12:00 LT en Septembre, 18:00 LT en Décembre (voir Figure 2.4).

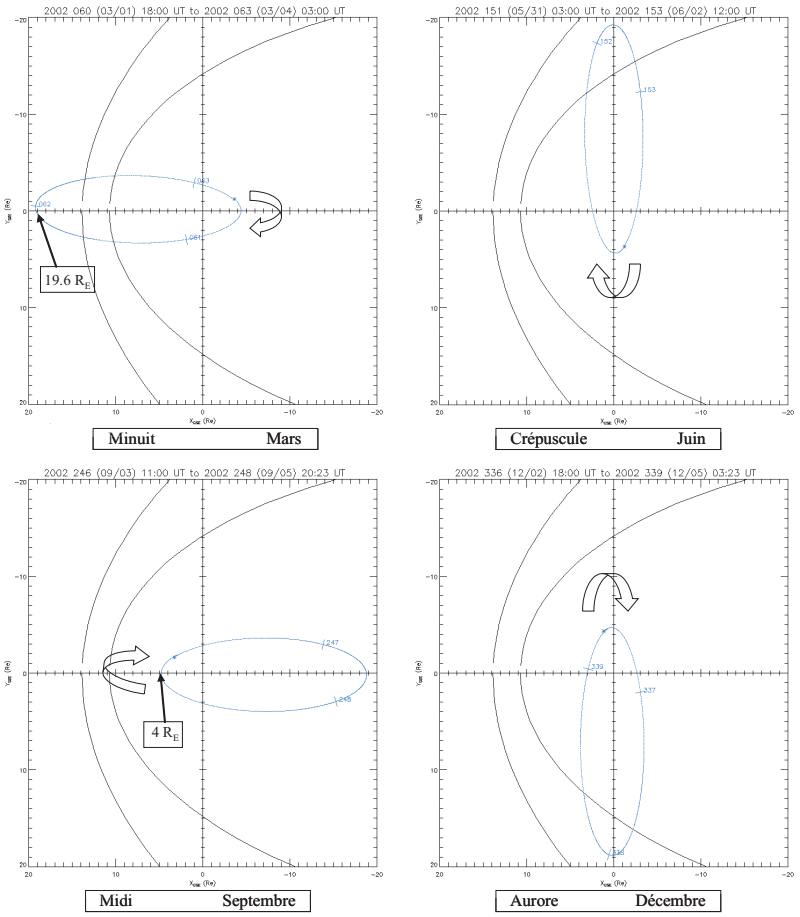

Figure 2.4: *Précession de l'orbite des quatre satellites CLUSTER durant une année, permettant de traverser les différents temps locaux LT à différentes périodes de l'année (D'après ESA).*

2.3 Instruments

Chaque satellite CLUSTER, appelé respectivement Rumba (C1), Salsa (C2), Samba (C3), Tango (C4), est de la forme d'une galette cylindrique de hauteur 1.3 m et de largeur 2.9 m, évidée en son centre, autour de laquelle sont placés les onze instruments (Figures 2.5, 2.6, 2.7).

Dans cette étude, nous utiliserons les données provenant de cinq instruments:

- WHISPER, Waves of HIgh frequency and Sounder for Probing Electron density by Relaxation (Figure 2.5, n° 4) [Décréau et al., 1997];
- EFW, Electric Field and Wave (Figure 2.5, n° 2) [Gustafsson et al., 1997];
- CIS, Cluster Ion Spectrometry (Figure 2.6, n° 2) [Rème et al., 1997];
- EDI, Electron Drift Instrument (Figure 2.7, n° 2) [Paschmann et al., 1997];
- FGM, FluxGate Magnetometer (Figure 2.7, n° 1) [Balogh et al., 1997].

Une description de ces instruments est donnée dans les paragraphes suivants. Les autres instruments à bord des satellites CLUSTER, non directement utilisés dans cette étude, mais néanmoins représentés sur les Figures 2.5, 2.6 et 2.7, sont:

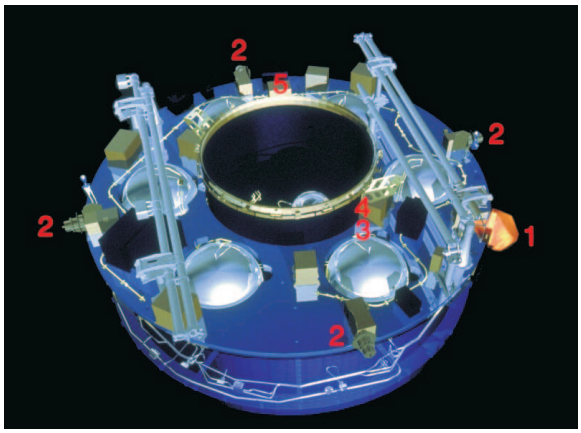

Figure 2.5: *Positionnement des instruments ondes sur un satellite CLUSTER (D'après ESA):* **1** *STAFF (Fluctuations magnétiques et électriques)* **2** *EFW (Champ électrique et ondes)* **3** *DWP (Processeur des expériences ondes)* **4** *WHISPER (Densité electronique et ondes de plasma)* **5** *WBD (Formes d'onde du champ électrique)*

.

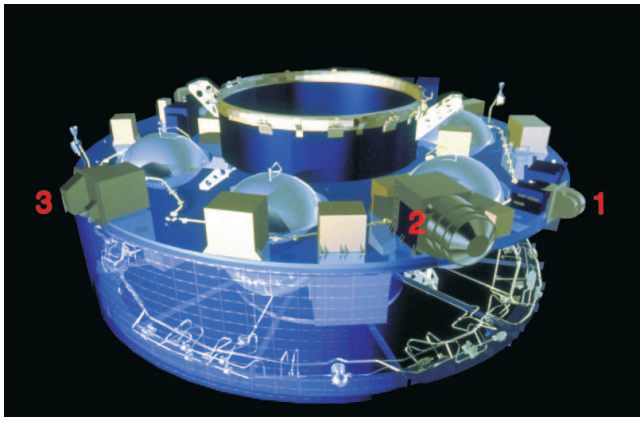

Figure 2.6: *Positionnement d'un deuxième groupe d'instruments, les analyseurs de particules, sur un satellite CLUSTER (D'après ESA):* **1** *PEACE (Distributions des électrons)* **2** *CIS (Distributions des ions)* **3** *RAPID (Electrons et ions de haute énergie)*

.

- STAFF, Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuations (Figure 2.5, n° 1) [Cornilleau-Wehrlin et al., 1997];
- DWP, Digital Wave Processing (Figure 2.5, n° 3) [Woolliscroft et al., 1997];
- WBD, Wide Band Data (Figure 2.5, n° 5) [Gurnett et al., 1997];
- PEACE, Plasma Electron And Current Experiment (Figure 2.6, n° 1) [Johnstone et al., 1997];
- RAPID, Research with Adaptive Particle Imaging Detector (Figure 2.6, n° 3) [Wilken et al., 1997];
- ASPOC, Active Spacecraft POtential Control (Figure 2.7, n° 3) [Riedler et al., 1997].

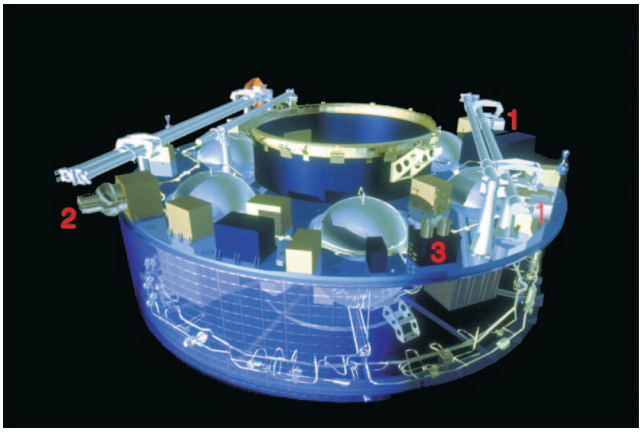

Figure 2.7: *Positionnement d'un troisième groupe d'instruments sur un satellite CLUSTER (D'après ESA):* **1** *FGM (Champ magnétique)* **2** *EDI (Vitesse de dérive des électrons)* **3** *ASPOC (Contrôle du potentiel du satellite)*

.

2.3.1 L'instrument WHISPER

WHISPER est un instrument onde formant avec STAFF, EFW, DWP et WBD le consortium WEC, Wave Experiment Consortium [Pedersen et al., 1997]. WHISPER consiste principalement en une antenne de réception composée d'un câble électrique de 88 m et de deux sondes sphériques disposées à ses extrémités (éléments de l'instrument EFW), un émetteur d'ondes et un récepteur incluant un analyseur de spectres (éléments propres à WHISPER), et enfin un système d'acquisition et de traitement de données (éléments de l'expérience DWP). WHISPER est dédié à l'étude du signal électrique dans la gamme de fréquence allant de 2 à 80 kHz. La résolution en fréquence est de 163 Hz, et celle en temps de 2.2 secondes en mode normal et 0.3 secondes en mode "burst". L'instrument possède deux modes opérationnels: un mode passif et un mode actif.

Le mode passif, dit mode "ondes naturelles" permet l'enregistrement des émissions naturelles électrostatiques et électromagnétiques émises dans les différentes régions traversées par les satellites (voir Figure 2.8). Les différentes signatures permettent l'estimation de la fréquence

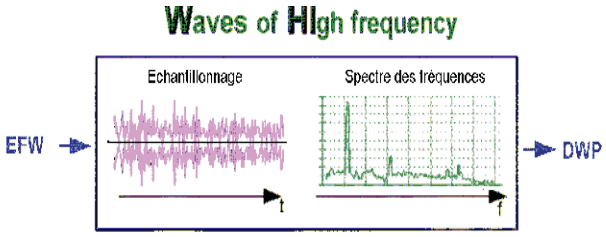

Figure 2.8: *Croquis simplifié de fonctionnement de l'instrument WHISPER en mode passif (D'après Décréau et al. [2001b]).*

plasma électronique F_{pe} [Canu et al., 2001]. Par exemple, dans le cas où la fréquence hybride haute, F_{uh}, est observée sur les spectrogrammes produits par WHISPER, cette quantité, associée à la gyrofréquence électronique, F_{ce}, déterminée par le sondeur, permet de déduire F_{pe}, à partir de la relation suivante:

$$F_{pe} = (F_{uh}^2 - F_{ce}^2)^{1/2} \tag{2.1}$$

En mode actif, dit mode "sondeur", l'instrument analyse les différentes résonances du milieu environnant excité par un train d'ondes envoyé par l'émetteur connecté à une antenne de l'expérience EFW durant 1 ou 0.5 millisecondes toutes les 52 secondes à différentes fréquences (voir Figure 2.9). Le récepteur, connecté à l'autre antenne d'EFW, enregistre le signal reçu. Cela permet in fine l'identification de F_{pe} [Trotignon et al., 2001, 2003; Rauch et al., 2006], qui est reliée à la densité électronique N_e par la relation suivante:

$$F_{pe}[\text{kHz}] = 9(N_e[\text{cm}^{-3}])^{1/2} \tag{2.2}$$

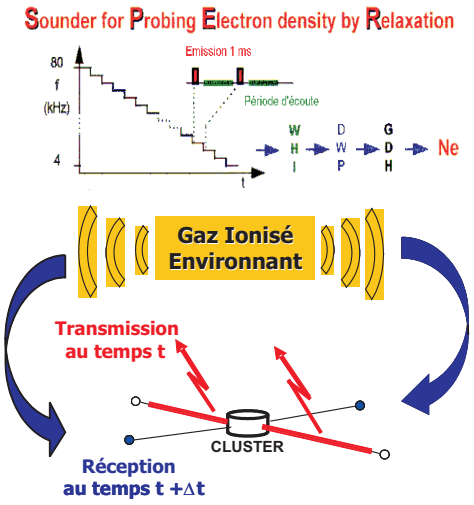

Figure 2.9: *Croquis simplifié de fonctionnement de l'instrument WHISPER en mode actif (D'après Décréau et al. [2001b]).*

L'instrument WHISPER est décrit de manière plus détaillée par Décréau et al. [1997, 2001a].

La Figure 2.10 représente deux spectrogrammes temps-fréquence du champ électrique enregistrés par l'instrument WHISPER à bord de C4 durant 10 heures d'orbite le 26 Février 2001. Le spectrogramme supérieur correspond aux ondes naturelles mesurées dans le cadre du mode passif, alors que le spectrogramme inférieur représente les ondes stimulées par l'instrument lors du mode actif. Durant cette partie d'orbite, les satellites passent de la magnétosphère au vent solaire, en traversant différentes autres régions indiquées sur la figure. Deux frontières caractéristiques de l'environnement terrestre sont également clairement traversées: la magnétopause et le choc d'étrave. Dans le panneau inférieur, de fortes résonnances sont observées dans la magnétogaine et dans le vent solaire au voisinage de la fréquence plasma. Dans la magnétosphère, d'autres résonnances sont observées, au niveau de la gyrofréquence des électrons et de ses harmoniques. La traversée de la magnétopause vers 06:00 UT sera étudiée en détail dans le Chapitre 7.

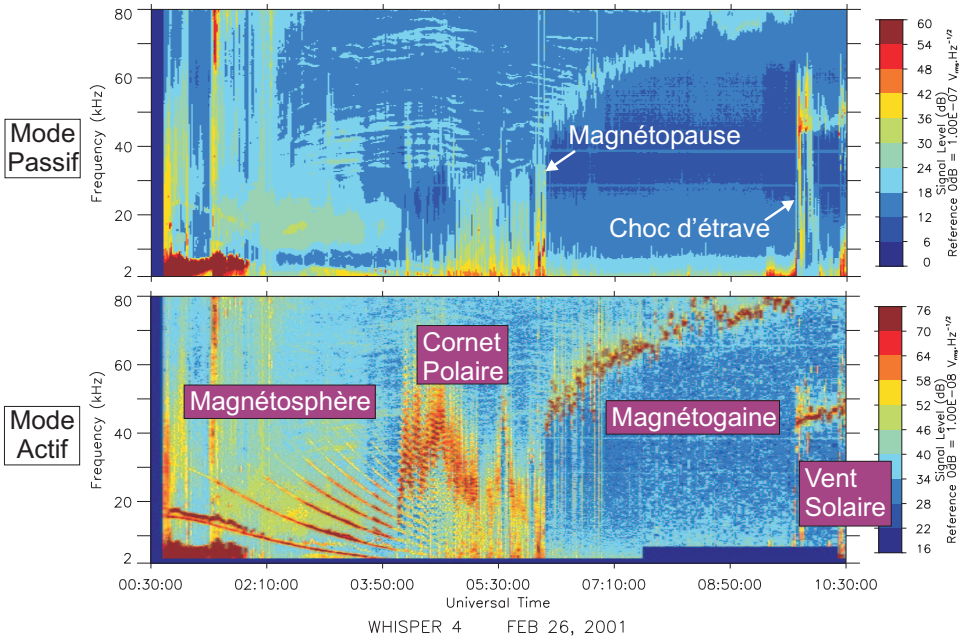

Figure 2.10: *Spectrogrammes temps-fréquence du champ électrique enregistrés par WHISPER à bord de C4 le 26 Février 2001, indiquant les différentes régions et frontières traversées durant les 10 heures d'orbite. L'échelle de couleur correspond à l'intensité du signal électrique (Adapté de Darrouzet et al. [2002]).*

2.3.2 L'instrument EFW

L'instrument EFW comporte deux paires de sondes sphériques montées sur des câbles électriques déployés à une distance de 44 m dans le plan de rotation du satellite. Il mesure ainsi le champ électrique, ainsi que le potentiel du satellite V_{sc}, qui est en fait la différence de potentiel entre les sondes et le corps du satellite. Le potentiel du satellite est contrôlé à l'aide d'un courant de polarisation, qui permet de placer ce potentiel à proximité du potentiel de plasma, alors qu'en

l'absence de ce contrôle, le corps du satellite s'ajusterait au potentiel dit flottant, supérieur de plusieurs dizaines de volt à celui du plasma. En utilisant une relation empirique non linéaire, la densité des électrons N_e peut être déduite de V_{sc} [Pedersen, 1995; Laakso et Pedersen, 1998; Moullard et al., 2002]. Les mesures faites par EFW peuvent être calibrées en utilisant les valeurs absolues de la densité électronique fournie par l'instrument WHISPER [Pedersen et al., 2001]. Cela n'est cependant possible que dans les régions où la fréquence plasma est inférieure à 80 kHz, c'est-à-dire lorsque la densité électronique est inférieure à 80 cm^{-3}. Une description détaillée de l'instrument EFW est effectuée par Gustafsson et al. [1997, 2001].

2.3.3 L'instrument CIS

L'instrument CIS est constitué de deux spectromètres complémentaires: CODIF (COmposition and DIstribution Function analyser) et HIA (Hot Ion Analyser). Le spectromètre de masse CODIF fournit les fonctions de distribution à trois dimensions des principaux ions présents dans la magnétosphère (H^+, He^+, He^{++} et O^+), sur une gamme d'énergie allant d'environ 0 à 40 keV/q, avec une résolution temporelle de l'ordre d'une rotation du satellite (4 secondes). Cet instrument est également équipé d'un système RPA (Retarding Potential Analyser), qui lui permet d'effectuer des mesures dans une gamme d'énergie plus appropriée à l'étude de la plasmasphère: $0.7 - 25$ eV/q, par rapport au potentiel du satellite. La vitesse des ions H^+ est déterminée à partir des fonctions de distribution. Cependant, la précision des mesures de vitesse peut-être limitée dans le cas de faibles densités (par exemple dans les panaches plasmasphériques), et est également influencée par le potentiel du satellite ainsi que par les limites inférieures et supérieures de la bande d'énergie. Celle limitation est particulièrement importante dans la direction de l'axe de rotation du satellite, mais l'instrument peut fournir des données fiables en ce qui concerne la direction de la vitesse, et en particulier dans le plan de rotation des satellites. L'instrument CODIF fonctionne dans ce mode RPA sur les satellites C1, C3 et C4. Le second spectromètre, HIA, n'offre pas de résolution massique, mais possède une meilleure résolution angulaire que CODIF, jusqu'à $5.6° \times 5.6°$. L'expérience CIS est décrite de manière plus détaillée par Rème et al. [1997, 2001].

2.3.4 L'instrument EDI

L'instrument EDI est basé sur la propriété de dérive des électrons. Il consiste en l'émission de deux faisceaux d'électrons perpendiculairement au champ magnétique dans des directions opposées, puis de leur détection après une ou plusieurs girations dans le champ magnétique ambiant. La vitesse de dérive des électrons est alors déduite de la direction des faisceaux reçus par l'instrument, et de la différence de temps de parcours entre les deux faisceaux. Cet instrument fonctionne sur les satellites C1, C2 et C3. Les données utilisées ici ont été nettoyées et moyennées en utilisant une technique décrite par Matsui et al. [2003, 2004]. Une description plus détaillée de cet instrument ainsi que de ses différents modes d'opération se trouve dans les publications de Paschmann et al. [1997, 2001].

2.3.5 L'instrument FGM

L'instrument FGM est composé de deux magnétomètres tri-axiaux de type "fluxgate", associés à une unité de traitement de données. Il mesure les trois composantes du champ magnétique avec une résolution temporelle allant de 22.4 Hz en mode normal à 67 Hz en mode "burst". Cinq modes opératoires sont utilisés afin de fournir une bonne résolution dans les différentes régions de la magnétosphère, que ce soit dans le vent solaire (champ magnétique attendu entre 3 et 30 nT) ou dans la magnétosphère interne (champ magnétique pouvant atteindre 1000 nT). Après une inter-calibration des mesures entre les quatre satellites, la résolution instrumentale obtenue est de l'ordre de 0.1 nT. L'ensemble des caractéristiques techniques de cette expérience peut être trouvé dans Balogh et al. [1997, 2001].

CHAPITRE 3

Autres Missions

3.1 La mission IMAGE

3.1.1 Généralités

Le satellite IMAGE (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) a été lancé le 25 mars 2000 sur une orbite elliptique, avec un périgée de 7400 km, un apogée de 8.2 R_E, une inclinaison de 90° et une période de rotation de 13.5 heures [Burch, 2000] (voir Figure 3.1). Son objectif est d'étudier, à l'échelle globale, comment la magnétosphère de la Terre réagit au vent solaire et à ses fluctuations, en imageant la magnétosphère terrestre. La plate-forme d'IMAGE est pour cela équipée de six instruments utilisant trois techniques différentes d'imagerie: l'imagerie par ultraviolet des ions hélium et des atomes d'hydrogène énergétiques, l'imagerie par sondage radio, et l'imagerie d'atomes neutres dans trois gammes d'énergie différentes.

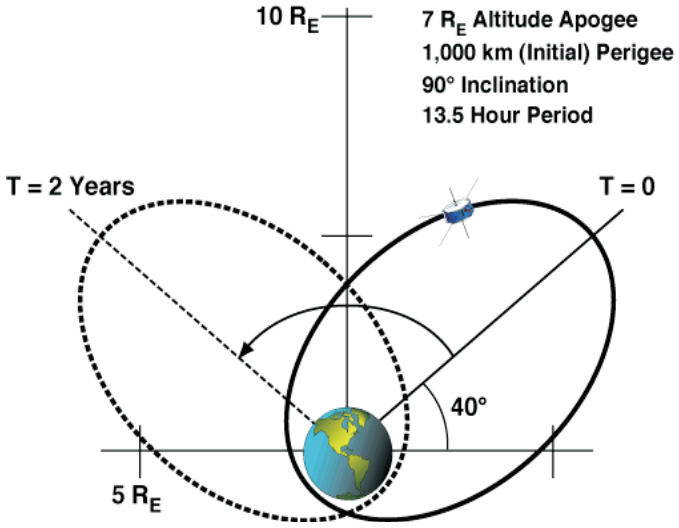

Figure 3.1: *Orbite du satellite IMAGE, avec ses principales caractéristiques (D'après NASA).*

Les six instruments à bord du satellite IMAGE sont:

- EUV, Extreme Ultraviolet (voir Figure 3.2) [Sandel et al., 2000];
- FUV, Far Ultraviolet [Mende et al., 2000];
- RPI, Radio Plasma Imager [Reinisch et al., 2000];

- LENA, Low Energy Neutral Atom Imager [Moore et al., 2000];
- MENA, Medium Energy Neutral Atom Imager [Pollock et al., 2000];
- HENA, High Energy Neutral Atom Imager [Mitchell et al., 2000].

Nous utilisons dans cette thèse, notamment dans l'étude des panaches magnétosphériques, uniquement l'instrument EUV dont une description détaillée est donnée dans le paragraphe suivant. En effet, son mode de fonctionnement (l'imagerie globale) nous a paru être très complémentaire par rapport aux données de la mission CLUSTER que nous avons utilisées. Par ailleurs, l'instrument RPI ne permet pas de distinguer très clairement les panaches d'autres structures de densité, et les imageurs d'atomes ne correspondaient pas au cadre de cette thèse.

3.1.2 L'instrument EUV

3.1.2.1 Généralités

L'instrument EUV fournit des images globales de la plasmasphère [Sandel et al., 2000]. C'est un système composé de trois caméras identiques avec champ de vision complémentaire, qui détectent la lumière émise dans la gamme de 30.4 nm diffusée par les ions He^+ dans la plasmasphère. Un schéma de l'instrument est indiqué sur la Figure 3.2. Le seuil inférieur de sensibilité de l'instrument a été estimé à $4-8$ ions $He^+\ cm^{-3}$, ou 40 ± 10 électrons ou ions $H^+\ cm^{-3}$, si on suppose un rapport He^+/H^+ autour de $0.1-0.2$ [Goldstein et al., 2003b].

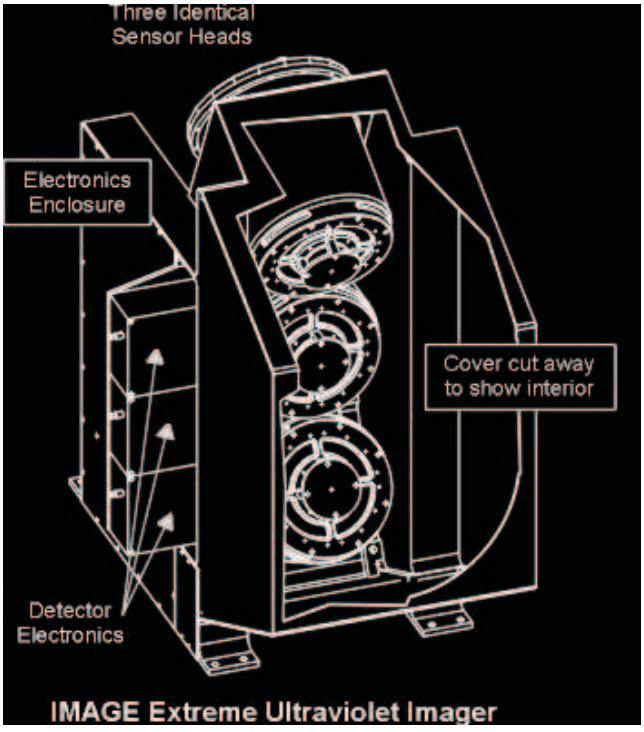

Figure 3.2: *Schéma de l'instrument EUV (D'après NASA).*

L'instrument EUV produit des images toutes les 10 minutes avec une résolution spatiale de

0.1 R_E, et en raison de l'apogée élevé du satellite IMAGE (partie de l'orbite où les images de la plasmasphère sont prises), et du grand angle de vue d'EUV, ce dernier produit des images montrant la structure de la plasmasphère dans son ensemble. Des séquences successives de ces images à deux dimensions montrent ainsi l'évolution et le mouvement de la plasmasphère et des différentes structures s'y trouvant. En effet, par comparaison de la position d'une même structure entre plusieurs images successives, il est notamment possible d'estimer une vitesse azimutale et radiale de différentes parties d'un panache plasmasphérique (le pied de celui-ci ou son extrémité), comme cela sera fait dans le Chapitre 13. Cet instrument a permis l'observation de nombreuses structures jusque là seulement expliquées théoriquement, ou même parfois inconnues, telles qu'une "épaule"[1], une "encoche"[2], un "canal"[3], un "doigt"[4], une "crénulation"[5], ou un "panache"[6]. Ces différentes structures sont indiquées, en Anglais, sur la Figure 3.3. Dans cette étude, nous n'analyserons que les panaches, dans le Chapitre 13.

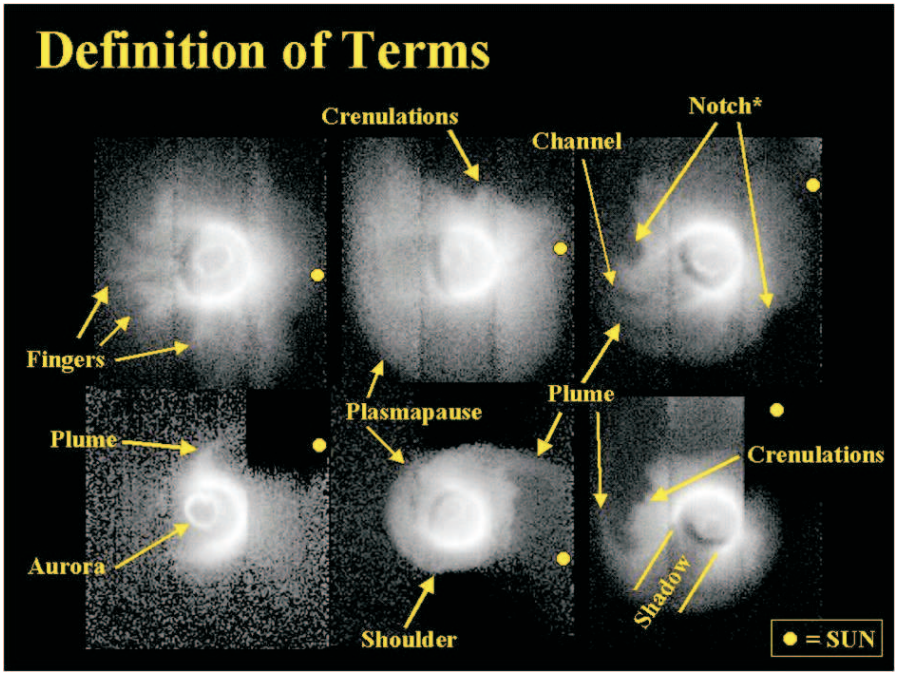

Figure 3.3: *Structures observées par l'instrument EUV à bord du satellite IMAGE (D'après [Gallagher, communication personnelle, 2003]).*

[1] Anglais: Shoulder
[2] Anglais: Notch
[3] Anglais: Channel
[4] Anglais: Finger
[5] Anglais: Crenulation
[6] Anglais: Plume

3.1.2.2 Analyse des images EUV

Cet instrument EUV produit donc des images de la plasmasphère toutes les 10 minutes. Afin d'améliorer la comparaison avec les autres jeux de données, ces images sont projetées dans le plan magnétique équatorial d'un dipôle, en affectant à chaque pixel de l'image la valeur minimale du paramètre L [McIlwain, 1961] (voir définition de ce paramètre dans l'Annexe A) le long de la ligne de visée [Roelof et Skinner, 2000; Goldstein et al., 2003b; Gallagher et al., 2005]. Ce paramètre L et un modèle de dipôle magnétique ont été choisis pour effectuer cette projection, car les images EUV montrent la plasmasphère depuis une distance pas trop éloignée de la Terre, où l'approximation du dipôle peut être utilisée (du moins dans le cas d'activité géomagnétique faible à modérée). Le signal projeté est ensuite converti en "column abundance" en utilisant une estimation du flux solaire à 30.4 nm, estimation basée sur le modèle empirique d'irradiance solaire SOLAR2000 [Tobiska et al., 2000]. Finalement, la "column abundance" est elle-même convertie en pseudo-densité en la divisant par une estimation de la distance le long de la ligne de visée qui contribue le plus à l'intensité de l'image (pour plus de détails, voir Gallagher et al. [2005]). Par conséquent, les images EUV qui seront présentées par la suite, et notamment dans le Chapitre 13, montrent une distribution équatoriale de la pseudo-densité d'ion He^+ en fonction de L et du "temps magnétique local", ou MLT[7] (voir définition dans l'Annexe A).

Les images EUV ont ensuite été traitées pour filtrer le bruit (apparaissant dans les images comme les variations spatiales à haute fréquence). En effet, les structures de densité à petite échelle ne sont pas accessibles par l'instrument, en raison de sa résolution spatiale et parce que les intensités dans les images EUV sont déterminées par intégration le long de la ligne de visée. Pour augmenter le rapport signal sur bruit, nous avons emboitées les images (boites de 2x2 pixels) puis nous les avons moyennées. Finalement, nous avons utilisé une méthode d'"histogram equalization" et une échelle de couleur appropriée afin d'améliorer le contraste dans les images.

3.2 La mission Viking

3.2.1 Généralités

Le satellite Viking de la Swedish Space Corporation (SSC) a été lancé le 22 février 1986 par une fusée Ariane sur une orbite polaire, avec un périgée de 820 km, un apogée de 13520 km, une inclinaison de 98.8° et une période de 262 minutes [Hultqvist, 1990]. La vitesse de rotation du satellite est de 3 rotations par minute, avec l'axe de rotation perpendiculaire au plan de l'orbite. Cette mission, de durée prévue de 8 mois, a en fait fourni des données durant 12 mois. Son objectif était d'étudier les régions polaires et aurorales, à l'aide de six instruments mesurant le champ électrique, le champ magnétique, les ions et les électrons dans différentes gammes d'énergie, les ondes de plasma dans les gammes des fréquences extrémement basses, ou ELF[8]

[7] Anglais: Magnetic Local Time
[8] Anglais: Extremely Low Frequency

et des très basses fréquences, ou VLF[9], et enfin, les émissions dans le domaine des ultraviolets. Dans cette étude, nous avons uniquement utilisé les mesures d'ondes dans la gamme des VLF faites par l'expérience V4H (High-Frequency Wave Experiment) décrite ci-dessous.

3.2.2 L'instrument V4H

L'instrument V4H mesure une composante du champ électrique à l'aide d'une des deux antennes dipolaires de 80 m disposées perpendiculairement à l'axe de rotation du satellite, ainsi que la composante du champ magnétique parallèle à l'axe de rotation, mesurée avec une antenne de type "air core loop" [Bahnsen et al., 1988]. Le signal ainsi mesuré est ensuite analysé à bord avec des analyseurs à balayage de fréquence (SFA[10]), fournissant ainsi un signal entre 9 et 500 kHz. La résolution temporelle de l'instrument est en moyenne de 2.4 secondes (1.2 en mode rapide). Cet instrument comporte également deux éléments actifs, un sondeur à relaxation et une mesure d'impédance mutuelle, qui fonctionnent durant environ 10% du temps. Ces données n'ont pas été utilisées dans cette étude, mais leurs effets et interférences sur les mesures d'onde ont été pris en considération. Nous nous sommes limités à l'analyse d'un seul des deux signaux (l'électrique), car le second (le magnétique) était souvent très bruité. Cette étude a été menée sur la bande de fréquence des VLF allant de 10 à 46 kHz. Sur cette bande de fréquence, la résolution était de 1 kHz.

3.3 Les satellites LANL

Depuis de nombreuses années il existe des satellites géosynchrones qui effectuent des mesures scientifiques autour de la Terre à une distance radiale de 6.6 R_E. Par exemple, certains satellites LANL ("Los Alamos National Laboratory") possèdent à leur bord l'instrument MPA ("Magnetospheric Plasma Analyser"), qui mesure la densité des ions dans la bande d'énergie 1 $-$ 130 eV/q [Bame et al., 1993]. Il faut noter que cette bande d'énergie ne couvre pas la partie la plus froide de la distribution des ions dans la plasmasphère, tout comme l'instrument CIS à bord des satellites CLUSTER. Les données provenant de cet instrument seront utilisés dans l'étude des panaches plasmasphériques (voir Chapitre 13), comme un moyen supplémentaire de mesures in situ de confirmer la présence de ces structures.

[9] Anglais: Very Low Frequency
[10] Anglais: Stepped Frequency Analyser

CHAPITRE 4

Simulations Numériques de Formation de la Plasmapause

4.1 Généralités

Différents modèles théoriques ont été introduits afin d'expliquer la formation de la plasmapause et de déterminer sa position. Les premières théories proposées étaient basées sur l'approximation magnétohydrodynamique (MHD[1]), qui représentait le champ électrique dans la plan équatorial par des lignes équipotentielles fermées. Ainsi la plasmapause correspondait à la "dernière équipotentielle fermée", ou LCE[2] [Nishida, 1966]. Cette théorie relativement simple fut rapidement critiquée, notamment par Dungey [1967], qui trouvait difficile de faire coïncider cette théorie avec les récentes observations de Carpenter [1966]. Ensuite, d'autres alternatives ont été proposées pour déterminer la position de la plasmapause, en utilisant une dernière équipotentielle fermée déformée [Grebowsky, 1970], ou en considérant la plasmasphère comme étant la région dans laquelle les tubes de flux sont restés fermés (ou en équilibre) durant au moins 6 jours [Chen et Wolf, 1972]. Enfin, une dernière théorie de formation de la plasmapause est basée sur le mécanisme d'instabilité d'interchange introduit par Lemaire [1974]. Ce mécanisme est décrit plus en détail dans le Paragraphe 4.2.

La formation des panaches plasmasphériques a été prédite par différents modèles théoriques. Ainsi, en raison de modifications du champ électrique de convection selon l'index d'activité géomagnétique K_p (voir définition dans l'Annexe A), la plasmasphère se déforme et des morceaux de plasma plasmasphérique se déplacent de la plasmasphère vers ses couches extérieures [Chen et Wolf, 1972; Chen et Grebowsky, 1974]. Une autre interprétation indique que ces éléments de plasma sont des bulles totalement séparées de la plasmasphère [Chappell, 1974]. Des simulations numériques utilisant le modèle MSFM ("Magnetospheric Specification and Forecast Model") ont clairement reproduit la formation et le déplacement des panaches plasmasphériques [Weiss et al., 1997]. Le mécanisme d'interchange permet également de prédire la formation et l'évolution de panaches [Lemaire, 2000; Pierrard et Lemaire, 2004; Pierrard et Cabrera, 2005].

[1] Anglais: Magnetohydrodynamic
[2] Anglais: Last Closed Equipotential

4.2 Description du modèle

Le modèle que nous utilisons dans cette étude pour prédire la position de la plasmapause ainsi que la formation de panaches plasmasphériques (voir Chapitre 13), est basé sur un mécanisme d'instabilité convective dans la plasmasphère: l'instabilité d'interchange introduite par Lemaire [1974, 1975, 2001]. Selon ce mécanisme, l'augmentation brusque de l'intensité du champ électrique dans le secteur après-minuit de temps local, associée à un sous-orage magnétique, est reponsable de cette instabilité. En effet, cette augmentation induit une augmentation de la vitesse de convection du plasma, ce qui entraîne un déséquilibre du plasma initialement en co-rotation. Par la suite, il se forme une surface où les composantes parallèles au champ magnétique des forces gravitationnelles et centrifuges sont équivalentes. Cette surface a été appelée la "surface de force parallèle nulle", ou ZPF[3] par Lemaire [1985]. Le long des lignes de champ magnétique tangentes à cette surface, un clivage se forme dans la distribution de densité: du côté extérieur, le plasma s'écoule vers le haut le long des lignes de champ, alors que du côté intérieur, il reste en équilibre hydrostatique et est en co-rotation avec la Terre. Ainsi, la distribution de densité est fortement diminuée au-delà de la ZPF, dont la surface équipotentielle tangente la plus intérieure détermine la plasmapause. Cette surface peut être déformée et déplacée par le champ électrique de convection. Cela peut permettre le détachement d'un élément de la plasmasphère comme indiqué sur la Figure 4.1, ou la ligne pointillée sur la droite de la figure représente cette ZPF.

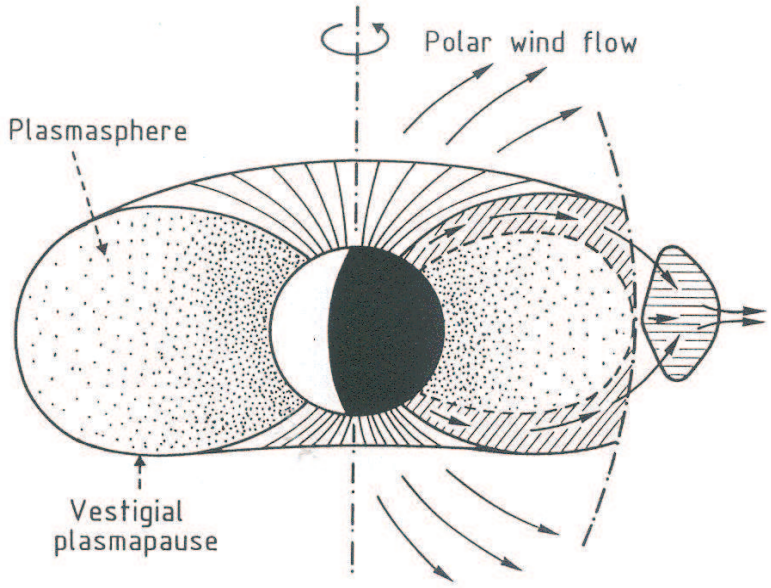

Figure 4.1: *Description du modèle basé sur le mécanisme d'instabilité d'interchange (D'après Lemaire et Gringauz [1998]).*

[3]Anglais: Zero Parallel Force

Ce mécanisme a été simulé en utilisant un modèle empirique de champ électrique appelé E5D, développé par McIlwain [1986]. Ce modèle a été développé à partir de mesures de spectres dynamiques de particules, effectuées à l'aide des satellites géostationnaires ATS-5 et ATS-6. Il est dépendant de l'indice géomagnétique K_p. La Figure 4.2 représente les lignes équipotentielles du champ électrique dans le plan équatorial pour trois valeurs différentes de l'indice K_p. On peut voir notamment l'asymétrie crépuscule-aurore, ainsi que le point d'inflexion dans la zone du matin.

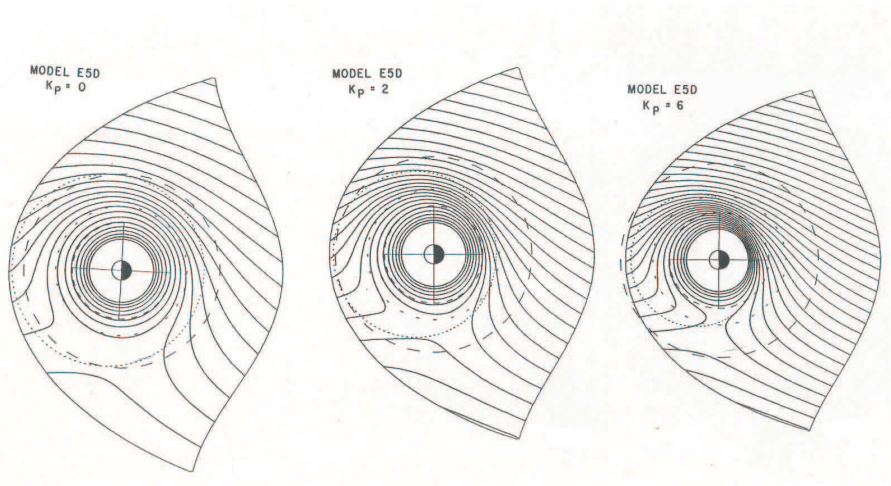

Figure 4.2: *Champ électrique déterminé par le modèle de McIlwain E5D et représenté dans le plan équatorial pour trois valeurs différentes de l'indice d'activité géomagnétique K_p (D'après McIlwain [1986]).*

Des simulations numériques combinant le mécanisme d'instabilité d'interchange avec ce modèle E5D permettent de prédire la position et la forme de la plasmapause dans le plan équatorial magnétique. Elles ont également permis de montrer la formation de différentes structures dans la plasmasphère, telles que les panaches, les "épaules"[4], ou les "encoches"[5] [Pierrard et Lemaire, 2004; Pierrard et Cabrera, 2005]. Des exemples de panaches plasmasphériques formés par cette simulation numérique seront donnés dans le Chapitre 13.

[4] Anglais: Shoulders
[5] Anglais: Notchs

PARTIE II

Outils d'Analyse

CLUSTER étant la première mission spatiale composée de quatre satellites identiques, nous allons consacrer cette partie principalement à deux outils d'analyse multipoints. Le Chapitre 5 présente les outils multipoints développés avant le lancement de CLUSTER. Le Chapitre 6 présente la technique permettant de déterminer le gradient spatial d'une quantité scalaire. Le Chapitre 7 est dédié à la méthode des délais. Enfin, le Chapitre 8 traite des études statistiques.

CHAPITRE 5

Généralités

5.1 Avant la mission CLUSTER

La magnétosphère est dominée par des structures à trois dimensions, dépendantes du temps et la plupart du temps en mouvement. Ainsi, des mesures avec un seul satellite sont souvent insuffisantes pour décrire de telles structures, leur évolution, et pour séparer les variations temporelles et spatiales. Des missions composées de deux satellites, telles que ISEE-1 et 2, AMPTE/CCE et IRM, Interball et Magion, ont permis une grande amélioration en déterminant une dimension spatiale, ce qui était cependant insuffisant au regard des trois dimensions des structures analysées.

Comme exemple d'analyse multi-satellite effectuée à l'aide de ces missions, nous pouvons citer celle de Walthour et al. [1994], qui analyse un "Flux Transfer Event" à l'aide des deux satellites ISEE-1 et 2, afin de déterminer la taille et la vitesse de déplacement d'une telle structure. Egalement, une étude utilisant ces deux satellites ISEE, ainsi que IMP-8 et AMPTE/CCE, a permis de déterminer la vitesse du front d'un courant transverse de rupture de la queue en évaluant les différents délais entre les satellites [Sauvaud et al., 1996]. La comparaison entre les profils de densité mesurés par deux satellites ayant une trajectoire semblable séparée de quelques centaines de kilomètres, tels que ISEE-1 et 2, a permis de déterminer l'évolution de la magnétopause dans le temps [Hubert et al., 1998]. La vitesse de la magnétopause a pu également être déterminée en utilisant les satellites AMPTE/UKS et IRM, à partir de la différence de temps de traversée d'une même structure par les deux satellites [Bauer et al., 2000]. Une première étude de structure en trois dimensions, en l'occurrence la détermination de la direction normale au choc interplanétaire, a été effectuée par Russell et al. [1983] en utilisant les satellites ISEE-1, 2, 3 et IMP-8.

La mission Interball composée de deux satellites principaux (Interball-Tail et Interball-Auroral), chacun accompagné de son sous-satellite (Magion-4 et 5) a également permis des études multipoints, mais seulement entre 2 satellites (le satellite principal avec son sous-satellite). C'était en fait une mission deux fois deux satellites. Ainsi, Interball-Tail et Magion-4 ont permis une étude détaillée d'événements transitoires observés à la frontière extérieure de la magnétosphère du côté du crépuscule, et de comparer les observations entre les deux satellites traversant ces structures à des instants et positions différentes [De Keyser et al., 2001]. Ces deux mêmes satellites ont aussi été utilisés pour déterminer des corrélations spatiales entre des structures magnétiques quasi-harmoniques, et ainsi en déduire une limite inférieure de leur durée de vie [Eiges et al., 2002].

L'utilisation d'un satellite géostationnaire et d'un autre dans un plan méridien peut aussi per-

mettre une étude comparative d'une même région (voir par exemple l'analyse du "renflement"[1] plasmasphérique avec GEOS-2 et DE-1 par Décréau et al. [1986]).

Enfin, la combinaison de données satellitaires et de mesures radar effectuées au sol permettent d'analyser sous différents angles un même événement ou une même structure (un exemple avec Foster et al. [2002] analysant un panache plasmasphérique).

Par ailleurs, d'autres études ont été effectuées en utilisant un grand nombre de satellites afin de comparer les différentes observations, et de chercher des corrélations entre elles (voir par exemple Carpenter et al. [1993] dans la plasmasphère et Angelopoulos et al. [1996] dans le feuillet de plasma).

5.2 Dans le cadre de la mission CLUSTER

La mission CLUSTER, première mission composée de quatre satellites identiques, a lancé l'étude de nouveaux outils multipoints. Ainsi, plusieurs études sur les méthodes et outils d'analyse de mesures multipoints ont été développées et regroupées dans un livre publié par l'organisation ISSI (International Space Science Institute): Paschmann et Daly [1998]. L'ensemble de ces méthodes a pour but de faciliter l'étude à trois dimensions des structures du plasma magnétosphérique et de différencier les variations dans le temps et l'espace de différents paramètres physiques.

Ces différentes méthodes sont cependant dépendantes d'hypothèses liées au niveau de corrélation spatiale ou temporelle entre la structure à analyser et la distance de séparation entre les quatre satellites CLUSTER. Ainsi, dans le cas d'une forte corrélation spatiale (distance de séparation inférieure à la taille caractéristique), il est possible d'utiliser une technique d'analyse à quatre points, telle que la détermination des trois composantes du gradient spatial d'une quantité physique scalaire, ou du rotationnel d'un champ vectoriel. Cette méthode, introduite par Harvey [1998], sera présentée dans le Chapitre 6. Par ailleurs, dans le cas d'une bonne corrélation temporelle (intervalle de temps inférieur au temps caractéristique), la direction normale d'une frontière supposée plane ainsi que sa vitesse dans cette direction, est déterminée à partir des différences de temps de traversée de cette frontière par les quatre satellites et de leurs positions respectives (voir notamment Dunlop et al. [2002] et Marchaudon et al. [2004]). Cette méthode des délais sera introduite dans le Chapitre 7. En effectuant des hypothèses supplémentaires, une méthode de reconstruction de frontière est dans ce cas applicable. Deux techniques différentes ont été appliquées aux données de la mission CLUSTER. Une première est basée sur l'équation de Grad-Shafranov et permet une reconstruction des structures à deux dimensions de la magnétopause. Cette méthode avait été initialement développée pour des missions composées d'un seul satellite [Hu et Sonnerup, 2003], puis a été adaptée pour des missions multi-satellites comme CLUSTER [Hasegawa et al., 2004b]. Ainsi des cartes à deux dimensions du champ magnétique, de la vitesse du plasma ou de la pression du plasma peuvent être reconstruites, et la comparaison de ces résultats entre les différents satellites permettent d'étudier l'évolution de la magnétopause.

[1] Anglais: Bulge

Une deuxième méthode de reconstruction, empirique celle-ci, a été développée par De Keyser et al. [2002, 2004, 2005a], afin d'étudier également les mouvements de la magnétopause. Elle interprète les observations comme étant des structures stationnaires qui sont convectées à travers les satellites. Ainsi, les variations temporelles observées reflètent le mouvement des structures de plasma par rapport aux satellites. Il est donc primordial de déterminer le mouvement de ces structures, ou de la magnétopause en particulier, ce qui peut être fait en choisissant un système de référence qui se déplace avec la structure et dont l'axe X est dans la direction normale moyenne de ce déplacement. Ainsi on peut estimer la position de la magnétopause $x_{mp}(t)$ en intégrant son déplacement $v_{mp}(t)$ le long de l'axe X suivant la relation:

$$x_{mp}(t) = \int_{t'=t_0}^{t} v_{mp}(t')dt' + x_{mp}(t_0) \tag{5.1}$$

où $x_{mp}(t_0)$ est la position de référence au temps t_0. Alors que la vitesse $v_{mp}(t)$ est en général inconnue, il est supposé que la mesure locale de la vitesse du plasma est une bonne approximation pour cette vitesse [Paschmann et al., 1990]. Ainsi le profil spatial à travers la frontière de n'importe quelle quantité scalaire f est obtenu à partir du profil réellement observé $f(t)$ en traçant la courbe $f(x_{sc}(t) - x_{mp}(t))$, où $x_{sc}(t)$ est la position du satellite le long de l'orbite. Il est ainsi possible de reconstruire les variations de diverses quantités telles que la densité des ions ou des électrons, la magnitude du champ magnétique ou ses composantes, les vitesses de particules. Cette méthode a également été développée dans le cas de structures à deux dimensions, pour notamment reconstruire les oscillations de la magnétopause dues à des ondes de Kevin-Helmholtz [De Keyser et Roth, 2003; De Keyser et al., 2005b]. Cette méthode permet ainsi de déterminer la structure, le mouvement, ou l'accélération d'une frontière telle que la magnétopause et sa couche frontière à basse latitude.

Dans le cas d'une faible corrélation, temporelle et/ou spatiale, les observations multipoints, toujours très utiles, sont en général exploitées lors d'études de cas, avec comparaison classique de modèle à expérience. Enfin, les données CLUSTER peuvent être utilisées de manière statistique, pour des études à grande échelle. Dans ce cas, la présence de quatre satellites, bien que permettant un meilleur échantillonnage d'une région et des conditions géophysiques données, notamment dans le cas d'une grande distance de séparation entre les satellites, n'offre pas d'information supplémentaire déterminante. Un exemple avec un seul satellite, Viking, sera donné dans le Chapitre 8.

CHAPITRE 6

Gradient Spatial

6.1 Généralités

L'évaluation d'un gradient spatial est très importante car elle permet de quantifier l'évolution d'un paramètre physique dans les régions traversées par des satellites scientifiques. C'est notamment fondamental lorsque ceux-ci traversent des frontières, où certaines quantités physiques peuvent varier relativement rapidement. Cela peut également permettre de déterminer l'orientation d'une structure globale, par exemple en terme de distribution de densité au travers d'une région. La direction du gradient est donc très importante, mais également sa magnitude, qui permet de localiser au travers d'une structure traversée l'emplacement de la variation maximale d'une quantité physique donnée.

La détermination des trois composantes d'un gradient spatial requiert quatre satellites, ce qui est maintenant possible avec la mission CLUSTER, composée justement de quatre satellites identiques disposés en forme de tétraèdre. Une méthode des moindres carrés a été développée par C. C. Harvey pour déterminer le gradient spatial d'une quantité scalaire mesurée simultanément par quatre (ou plus) satellites différents (méthode décrite dans le Chapitre 12 du livre de l'ISSI par Harvey [1998] et résumée par Darrouzet et al. [2001a]). Une autre méthode basée sur la méthode barycentrique a été introduite par G. Chanteur dans le Chapitre 14 du même livre [Chanteur, 1998], produisant des résultats largement équivalents.

6.2 Méthode

Suivant la méthode des moindres carrés [Harvey, 1998], le gradient spatial d'une quantité scalaire est calculé le long de la trajectoire du centre de masse des quatre satellites CLUSTER. Il est déterminé à partir d'une quantité scalaire f^α (α=1,...,4) mesurée simultanément à bord des quatre satellites CLUSTER, en faisant l'hypothèse que les positions des satellites $\boldsymbol{x}^\alpha$ (α=1,...,4) sont assez proches les unes des autres, de telle manière que tous les satellites sont à l'intérieur de la même structure au même instant (c'est la condition que l'on appelle condition d'homogénéité). Le gradient peut être exprimé en terme de l'inverse d'un tenseur symmétrique formé par les positions relatives des satellites. Dans le cas de quatre satellites, ce tenseur symmétrique est appellé tenseur volumétrique R_{ji}, et pour $i = x, y, z$ s'écrit sous forme condensée:

$$R_{ji} = \frac{1}{4} \sum_{\alpha=1}^{4} x_j^\alpha x_i^\alpha \tag{6.1}$$

A partir de ses valeurs propres et de ses vecteurs propres, ce tenseur décrit les propriétés géométriques du tétraèdre formé par les quatre satellites [Robert et al., 1998]. Ainsi, les valeurs propres V^λ (λ=1,2,3) définissent les trois longueurs caractéristiques des axes principaux de l'ellipsoïde passant par le tétraèdre:

$$L_\lambda = 2\sqrt{V^{(\lambda)}} \tag{6.2}$$

avec $L_1 > L_2 > L_3$. Ces longueurs sont ensuite utilisées pour définir trois paramètres géométriques définissant le tétraèdre: la taille caractéristique L, l'élongation E et la planéité P, que l'on détermine à l'aide des relations suivantes:

$$\begin{aligned} L &= L_1 \\ E &= 1 - L_2/L_1 \\ P &= 1 - L_3/L_2 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Ainsi, les longueurs caractéristiques peuvent être déterminées par:

$$\begin{aligned} L_1 &= L \\ L_2 &= L(1-E) \\ L_3 &= L(1-E)(1-P) \end{aligned} \tag{6.4}$$

Quand aux vecteurs propres, ils définissent les directions d'élongation $\boldsymbol{e_E}$ et de planéité $\boldsymbol{e_P}$. On peut noter que L_1 est la longueur de l'axe principal le plus long, qui est dans la direction d'élongation $\boldsymbol{e_E}$, L_3 est la longueur de l'axe principal le plus court et est associée à la direction de planéité $\boldsymbol{e_P}$, alors que L_2 est la longueur de l'axe principal mutuellement perpendiculaire aux deux autres, dans la direction $\boldsymbol{e_L} = \boldsymbol{e_P} \times \boldsymbol{e_E}$. Ainsi le tenseur volumétrique peut s'exprimer sous sa forme inverse en utilisant ces paramètres de la manière suivante:

$$R_{ji}^{-1} = \frac{4}{L^2}\left[e_{Ej}e_{Ei} + \frac{1}{(1-E^2)}e_{Lj}e_{Li} + \frac{1}{(1-P^2)(1-E^2)}e_{Pj}e_{Pi}\right] \tag{6.5}$$

Nous pouvons noter que lorsque P = 1, les satellites sont coplanaires, alors que lorsque E = 1, les satellites sont colinéaires. Dans ces deux cas, il ne sera pas possible de calculer le gradient spatial, car le tenseur volumétrique devient alors singulier, et ne peut plus être inversé. Un tétraèdre sera dit régulier lorsque $E = P = 0$. Différentes formes de tétraèdres apparaissent lorsque ces paramètres varient: lorsque l'élongation augmente alors que la planéité reste petite, le tétraèdre tend vers une forme de cigare, et si la planéité augmente alors que l'élongation reste petite, le tétraèdre prend la forme d'un cercle applatis (voir Robert et al. [1998] pour plus de détails).

Les composantes du gradient spatial $\partial f/\partial i$ pour $i = x, y, z$ sont alors données par:

$$\frac{\partial f}{\partial i} = \frac{1}{2}\frac{1}{4^2}\sum_{j=x,y,z}\left[\sum_{\alpha=1}^{4}\sum_{\beta=1}^{4}\left(f^\alpha - f^\beta\right)\left(x_j^\alpha - x_j^\beta\right)\right] \times R_{ji}^{-1} \tag{6.6}$$

Nous allons maintenant étudier les limites de cet outil et évaluer les erreurs de ce calcul.

6.3 Limites - Erreurs

6.3.1 Généralités

La détermination pratique du gradient spatial est de fait une opération délicate: cette méthode opère des différences entre des quantités du même ordre, ce qui entraîne des erreurs numériques qui peuvent être relativement importantes. Ces erreurs peuvent être anisotropiques, dépendantes de la configuration des quatre satellites, qui est elle-même reflétée dans le tenseur volumétrique R_{ji} et dans la matrice de covariance, qui donne l'erreur estimée sur la détermination de la position de chaque satellite [Chanteur et Harvey, 1998]. Cette matrice de covariance est en fait utilisée dans la détermination globale de l'erreur sur le gradient, tout comme la précision sur les mesures. Dans certaines circonstances, il ne sera pas possible de déterminer le gradient spatial, lorsque par exemple les satellites sont coplanaires (ce qui équivaut à P = 1), ou colinéaires (L = 1). Ce calcul d'erreur sera détaillé dans le Paragraphe 6.3.2.

Par ailleurs, la condition d'homogénéité nécessite que les satellites soient proches les uns des autres par rapport à la taille caractéristique de la structure physique que l'on examine; dans ce cas, les différences entre les mesures simultanées f^{α} sont petites, augmentant ainsi l'incertitude sur les mesures relatives, et par conséquent l'erreur sur le gradient. Des tests sur la comparaison entre la taille caractéristique d'une structure donnée et la distance de séparation entre les satellites seront présentés dans le Paragraphe 6.4.

Ce gradient spatial pouvant être appliqué à toute grandeur scalaire, il est naturel de le faire notamment avec la densité électronique déterminée par WHISPER, d'autant plus que ces mesures possèdent une calibration absolue et une grande précision sur la détermination de la fréquence (163 Hz). Nous appliquerons aussi cet outil à la magnitude du champ magnétique mesurée par FGM avec une incertitude de seulement 0.1 nT. Pour réduire les erreurs décrites ci-dessus, nous filtrons les données afin de supprimer les variations à des échelles inférieures à celles qui nous intéressent, en lissant les profils avant d'en déterminer le gradient. Des exemples dans diverses régions de la magnétosphère seront donnés dans le Chapitre 6.5, ainsi que dans la plasmasphère dans la Partie III.

6.3.2 Calcul d'erreur

L'erreur sur la détermination du gradient spatial se divise en trois catégories:

- l'incertitude sur la détermination de la position des satellites,
- l'incertitude sur les mesures,
- la forme et la taille du tétraèdre (liées à la validité de la condition d'homogénéité).

Tout d'abord, définissons l'erreur sur le gradient spatial dépendante de la position et de la configuration des satellites [Harvey, communication personnelle, 2001]. Pour cela, repartons des paramètres géométriques du tétraèdre L, E et P, définis dans le Paragraphe 6.2 par l'équation 6.3. Ces paramètres dépendent par définition des valeurs propres du tenseur volumétrique R_{ji}, et il est ainsi possible de déterminer l'incertitude δL_{λ} sur ces trois paramètres, en calculant l'erreur sur le tenseur lui-même. Celle-ci est liée à la matrice de covariance $C^{\alpha}_{\lambda\lambda}$, qui décrit

l'incertitude sur les positions x_λ^α de chaque satellite α (α=1,...,4) dans la direction λ. Ainsi, on obtient:

$$\delta L_\lambda = 2\sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^{4}\left[\left(x_\lambda^\alpha - <x_\lambda>\right)^2 C_{\lambda\lambda}^\alpha\right]}{4\sum_{\alpha=1}^{4}\left[\left(x_\lambda^\alpha - <x_\lambda>\right)^2\right]}} \tag{6.7}$$

avec $<x_\lambda>$ la position du centre de masse des quatre satellites.

Par ailleurs, si $\partial f/\partial\lambda$ est le gradient spatial de la mesure f dans la direction λ, nous pouvons définir son incertitude par:

$$\delta\left(\frac{\partial f}{\partial\lambda}\right) = \sqrt{\left(\frac{\delta X_\lambda}{L_\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial\lambda}\right)^2\left(\frac{\delta L_\lambda}{L_\lambda}\right)^2} \tag{6.8}$$

avec

$$\delta X_\lambda = 2\sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^{4}\left[\left(x_\lambda^\alpha - <x_\lambda>\right)^2 \left(\delta f^\alpha\right)^2\right]}{4\sum_{\alpha=1}^{4}\left[\left(x_\lambda^\alpha - <x_\lambda>\right)^2\right]}} \tag{6.9}$$

où δf^α est l'incertitude sur la mesure f pour le satellite α.

En guise d'exemple, nous allons déterminer cette erreur dans le cas de mesures faites par l'instrument WHISPER. Comme indiqué précédemment, l'incertitude sur les mesures de fréquence est de 163 Hz. Dans le cas d'une variation typique de la densité de l'ordre de 2 cm^{-3}, cela nous conduit à une incertitude sur la densité δf = 0.05 cm^{-3}, et nous obtenons ainsi une précision relative sur la détermination du gradient de densité de l'ordre de 3 %.

A cette erreur sur le calcul du gradient spatial s'ajoute l'incertitude sur la condition d'homogénéité, condition décrite dans le Paragraphe 6.2. Il est impossible de quantifier exactement cette incertitude, mais les tests du paragraphe suivant nous aideront à en donner une estimation supérieure. En outre, l'orientation du tétraèdre par rapport à la structure considérée a également une importance sur la validité des résultats. En définitive, il est important et essentiel d'étudier les résultats de cet outil gradient spatial au cas par cas.

6.4 Exemples tests

Afin d'étudier les possibilités et limitations de cet outil d'analyse multipoint, nous allons appliquer le gradient spatial à différents modèles synthétiques, et pour différentes configurations des quatre satellites CLUSTER. Le premier test correspond à la traversée d'une frontière (voir Paragraphe 6.4.1), et le second au franchissement d'une structure ondulatoire (voir Paragraphe 6.4.2). Nous terminerons par la traversée d'une bulle de densité suivant le modèle de Harris (voir Paragraphe 6.4.3).

6.4.1 Traversée d'une frontière

Nous simulons la traversée d'une frontière planaire de la magnétosphère par les quatre satellites CLUSTER en évaluant le profil de densité qu'observeraient les satellites en traversant

cette frontière. Pour cela, nous utilisons une orbite réelle de CLUSTER le 26 Février 2001, entre 00:00 et 01:30 de temps universel (UT[1]). Durant cet intervalle de temps, le tétraèdre est relativement régulier ($P < 0.5$ et $L \approx 0.75$). Nous donnons les profils de densité par l'équation 6.10 appliquée à la position X^α dans la direction X-GSE des quatre satellites (α=1,...,4) en fonction de C, la taille charactéristique dans cette même direction de la structure traversée et en fonction du temps t par l'intermédiaire de la variation de la position X^α en fonction du temps:

$$N^\alpha(t) = N_1 + N_2 \tanh\left(\frac{X^\alpha(t)}{C}\right) \tag{6.10}$$

où N_1 et N_2 sont des constantes. Afin de tester la méthode du gradient, nous allons faire varier la taille de la structure C et la comparer avec la distance de séparation S entre les satellites, qui est ici d'environ 1000 km.

Le premier cas est caractérisé par une structure beaucoup plus grande que la distance de séparation: C = 9000 km. La Figure 6.1 représente la projection dans les plans XZ, YZ et XY GSE du gradient spatial de densité déterminé le long de la trajectoire du centre de masse des quatre satellites, durant la traversée de la frontière entre 00:00 et 01:40 UT. La trajectoire du centre de masse des satellites est tracée avec un code de couleur qui correspond ici à la magnitude du gradient le long de l'orbite; un triangle rouge indique l'extrémité de la trajectoire, et une croix rouge le milieu de celle-ci. Les projections du vecteur gradient calculé au centre de masse sont indiquées le long de la trajectoire par des flèches noires. Le profil de densité est représenté dans le panneau en bas à droite en fonction du temps UT. L'ensemble des figures représentant le gradient qui figurent dans cette thèse seront sur ce même format, sauf contre-indication. Nous obtenons ici une orientation correcte du gradient, qui se trouve uniquement dans la direction X durant toute la traversée, avec des composantes quasi-nulles dans les directions Y et Z. L'incertitude sur la condition d'homogénéité peut être ici estimée à environ 5 %. On remarque également que la magnitude du gradient (indiquée le long de la trajectoire par le code de couleur) est maximale autour du milieu de la structure de densité, ce qui est logique pour une structure symmétrique comme celle-ci.

Dans le cas d'une structure de la même taille que la distance de séparation entre les satellites (C = 1000 km), nous pouvons voir apparaître une petite composante du gradient spatial dans les directions Y et Z, même si le gradient est globalement dirigé dans la direction X (Figure 6.2). On peut qualifier ce comportement d'effets de bord, qui disparaissent au centre de la structure. L'erreur sur la condition d'homogénéité peut être ici estimée à 10 %.

Par contre, pour une frontière de petite taille (C = 100 km), le gradient n'est plus valide, avec des composantes dans les trois directions (Figure 6.3). La condition d'homogénéité n'est clairement plus du tout satisfaite. Dans ce cas, le gradient reflète plus la configuration du tétraèdre (allure des effets de bord) que la nature et les propriétés du milieu traversé, et l'erreur peut atteindre 50 % du gradient.

En conclusion, nous voyons qu'il est absolument nécessaire d'avoir les quatre satellites suffisamment proches par rapport à la taille caractéristique d'une frontière donnée, pour pouvoir évaluer correctement le gradient spatial de cette frontière. Par ailleurs, le premier cas nous

[1] Anglais: Universal Time

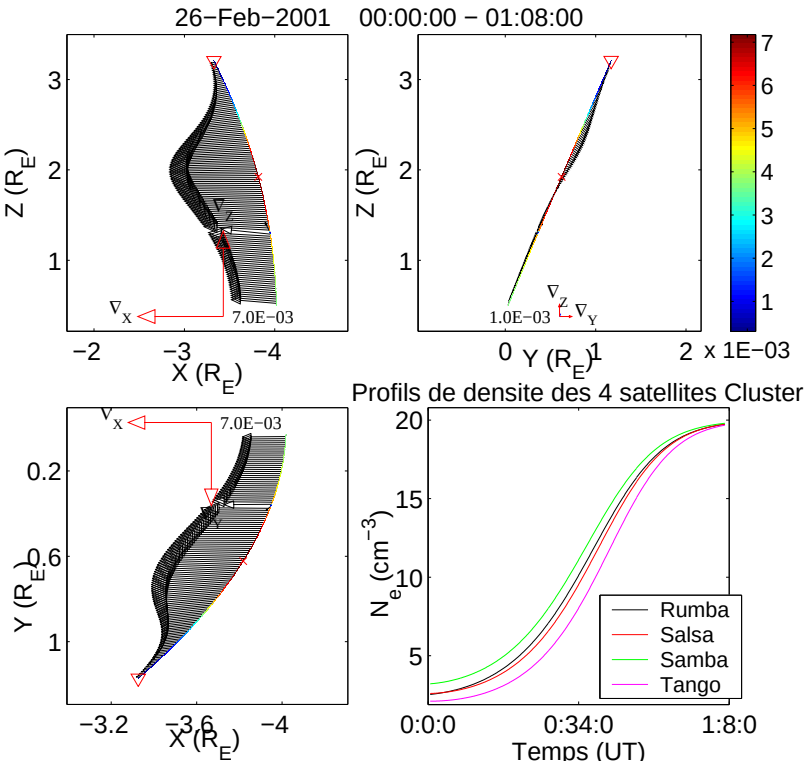

Figure 6.1: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une frontière modélisée le 26 Février 2001, dans le cas d'une structure de taille plus grande que la distance de séparation des satellites. Les projections du vecteur gradient calculé au centre de masse des quatre satellites sont indiquées par des flèches noires le long de la trajectoire du centre de masse. L'échelle de couleur correspond à la magnitude du gradient le long de la trajectoire. Un triangle rouge indique l'extrémité de la trajectoire, et une croix rouge le milieu de celle-ci. Le profil de densité est représenté dans le panneau en bas à droite en fonction du temps.*

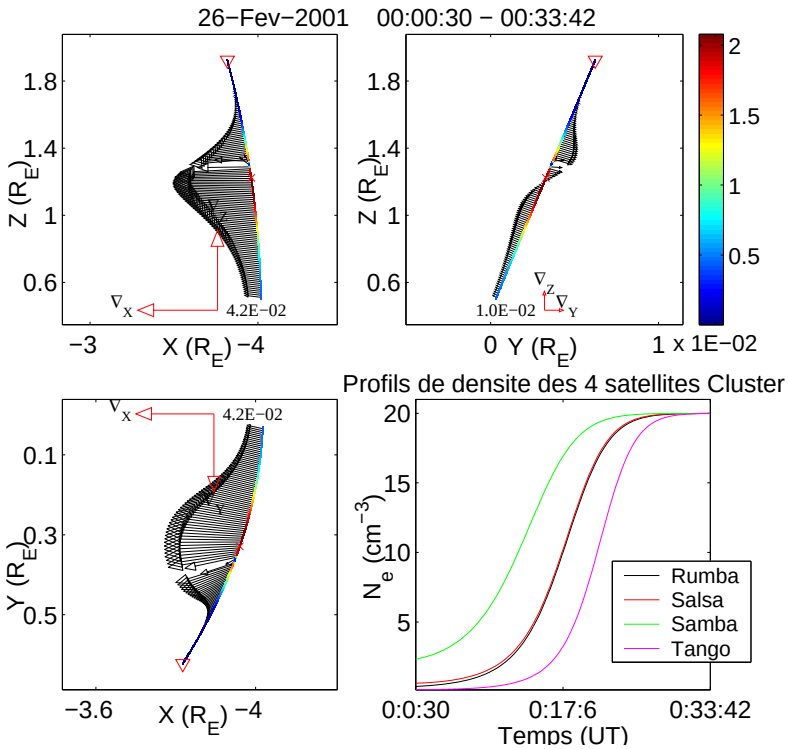

Figure 6.2: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une frontière modélisée le 26 Février 2001, dans le cas d'une structure de la même taille que la distance de séparation des satellites.*

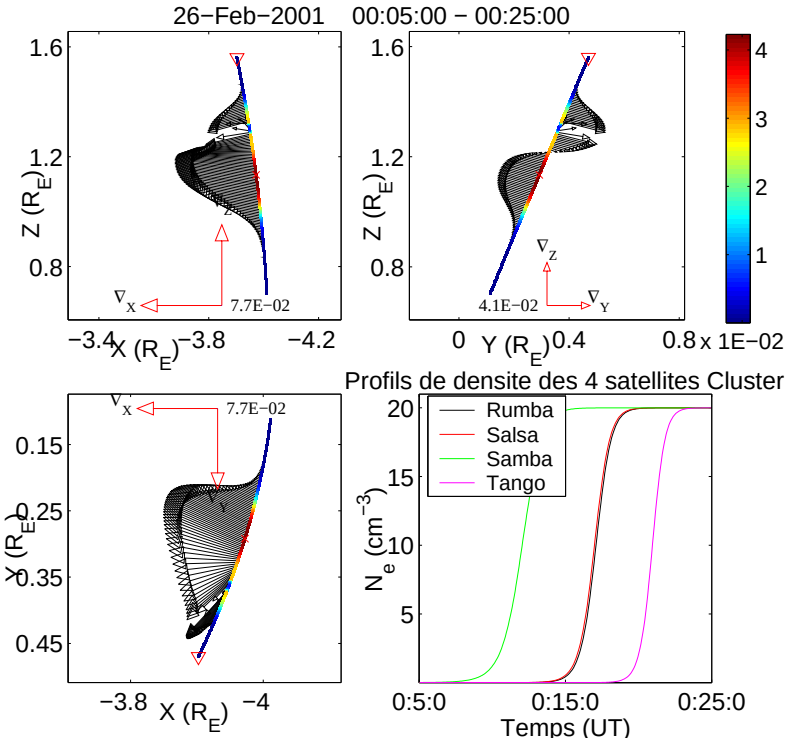

Figure 6.3: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une frontière modélisée le 26 Février 2001, dans le cas d'une structure de taille plus petite que la distance de séparation des satellites.*

indique que même si les paramètres géométriques définissant la forme du tétraèdre (E et P) ne sont pas optimum, nous pouvons cependant obtenir des résultats très corrects. Ainsi, nous pourrons par la suite étudier des traversées de magnétopause, ou de plasmapause, en tenant compte de ces remarques.

6.4.2 Traversée d'une onde

Il est également intéressant de tester notre outil gradient spatial dans le cas d'une traversée de structure ondulatoire, comme on peut en trouver dans la magnétogaine. En utilisant la même orbite et la même configuration que dans le cas précédent (26 Février 2001, distance de séparation de l'ordre de 1000 km, 00:00 $-$ 01:30 UT, $P < 0.5$ et $L \approx 0.75$), nous avons également évalué le profil de densité que l'on obtiendrait si une telle structure passait au travers des quatre satellites CLUSTER (α=1,...,4). En considérant une onde périodique de pulsation ω, de longueur d'onde L, se propageant dans la direction Y, la densité mesurée s'exprime par:

$$N^{\alpha}(t) = N_3 + N_4 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi Y^{\alpha}(t)}{L}\right) \tag{6.11}$$

où N_3 et N_4 sont des constantes. Comme la distance relative entre deux satellites le long de la direction Y varie très lentement (devant la période de l'onde), le déphasage de l'onde entre deux satellites reste à peu près constant au cours d'une période.

Dans le cas d'une onde de grande longueur d'onde (L = 10000 km), nous obtenons les profils de densité indiqués sur le panneau en bas à droite de la Figure 6.4. Le gradient est globalement dans la direction attendue (direction Y), mais il apparaît des composantes dans les directions X et Z aux extrema de la courbe en sinus (voir les flèches rouges). Cela se comprend facilement en regardant les profils de densité, où l'on voit que les satellites ne se trouvent pas en même temps dans la même structure, avec un chevauchement des quatre courbes de densité. Par contre, au voisinage du plus fort gradient (segment bleu), le gradient est correctement dirigé. Une incertitude moyenne sur la condition d'homogénéité peut être évaluée à 10 % dans ce cas.

Si les satellites traversent une onde de longueur d'onde du même ordre de grandeur que la distance de séparation entre eux (L = 2000 km), les erreurs observées dans le cas précédent deviennent plus importantes, mais le gradient reste globalement dans la direction Y durant l'ensemble de la traversée (Figure 6.5). Nous pouvons observer que le gradient est correctement défini lorsque les quatre satellites se trouvent exactement dans la même structure (au niveau des segments bleus par exemple), ce qui permet de délimiter visuellement les zones où l'outil gradient pourra être utilisé. Ainsi, au milieu de l'intervalle de temps (voir les flèches rouges), on observe des composantes du gradient dans les directions X et Z qui sont non négligeables. Une valeur moyenne de l'incertitude serait ici de 20 %.

La Figure 6.6 nous montre que dans le cas d'une onde de petite longueur d'onde par rapport à la distance entre les satellites (L = 150 km), les résultats ne sont plus du tout corrects, et les fausses valeurs du gradient dominent l'orientation globale du gradient. L'erreur sur la condition d'homogénéité est ici pratiquement de 100 %.

Dans ce cas d'une structure ondulatoire se déplaçant dans une direction déterminée, les résultats sont encore plus dépendants de la comparaison entre sa longueur d'onde et la distance

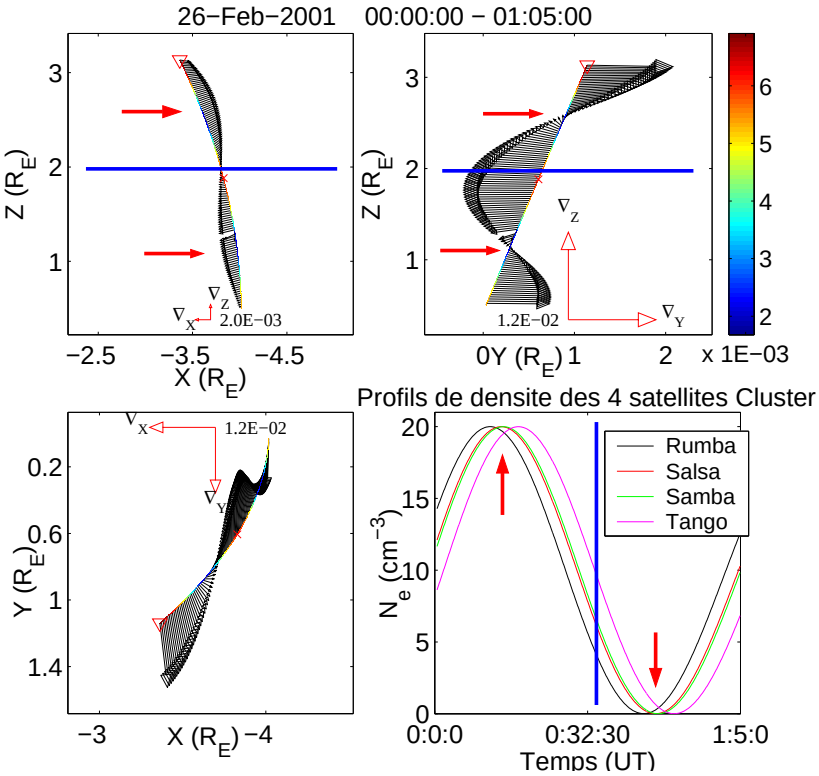

Figure 6.4: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure ondulatoire modélisée se propageant dans la direction Y, le 26 Février 2001, dans le cas d'une onde de longueur d'onde plus grande que la distance de séparation des satellites.*

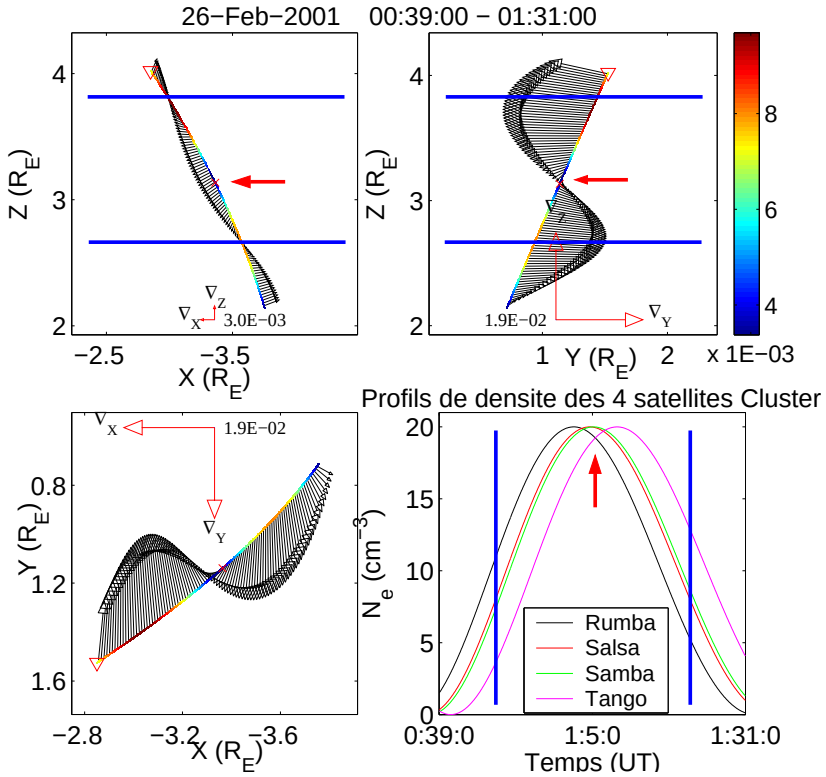

Figure 6.5: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure ondulatoire modélisée se propageant dans la direction Y, le 26 Février 2001, dans le cas d'une onde de même longueur d'onde que la distance de séparation des satellites.*

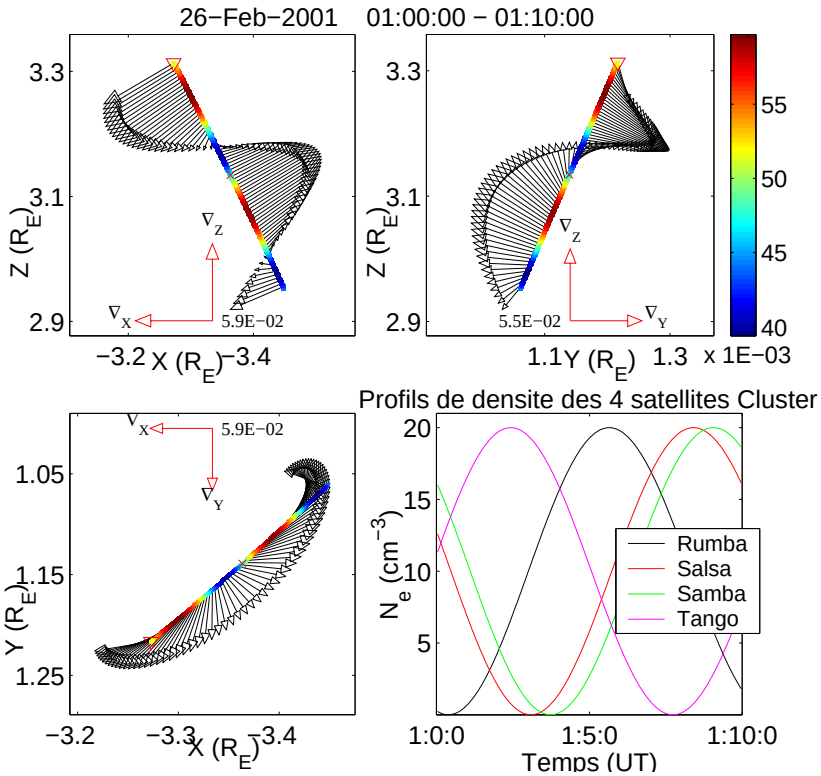

Figure 6.6: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure ondulatoire modélisée se propageant dans la direction Y, le 26 Février 2001, dans le cas d'une onde de longueur d'onde plus petite que la distance de séparation des satellites.*

de séparation entres les satellites. Ainsi, même dans le cas où ces deux paramètres sont du même ordre, il apparaît déjà un gradient dans de fausses directions.

6.4.3 Traversée d'une bulle de densité suivant le modèle de Harris

Ce dernier exemple test d'utilisation de l'outil gradient spatial est appliqué à la traversée d'une bulle de densité suivant le modèle de Harris [Harris, 1962], durant une orbite simulée de CLUSTER le 13 Janvier 2000, entre 11:35 et 12:25 UT. Durant cet intervalle de temps, les paramètres caractéristiques du tétraèdre sont satisfaisants (P et $E < 0.7$). Ce modèle nous donne la densité pour les quatre satellites CLUSTER (α=1,...,4) par l'équation suivante:

$$N^{\alpha} = N_5 + \frac{N_6}{\cosh^2\left(\frac{X^{\alpha}}{H_X}\right)} + \frac{N_7}{\cosh^2\left(\frac{Y^{\alpha}}{H_Y}\right)} + \frac{N_8}{\cosh^2\left(\frac{Z^{\alpha}}{H_Z}\right)} \tag{6.12}$$

où N_5, N_6, N_7 et N_8 sont des constantes.

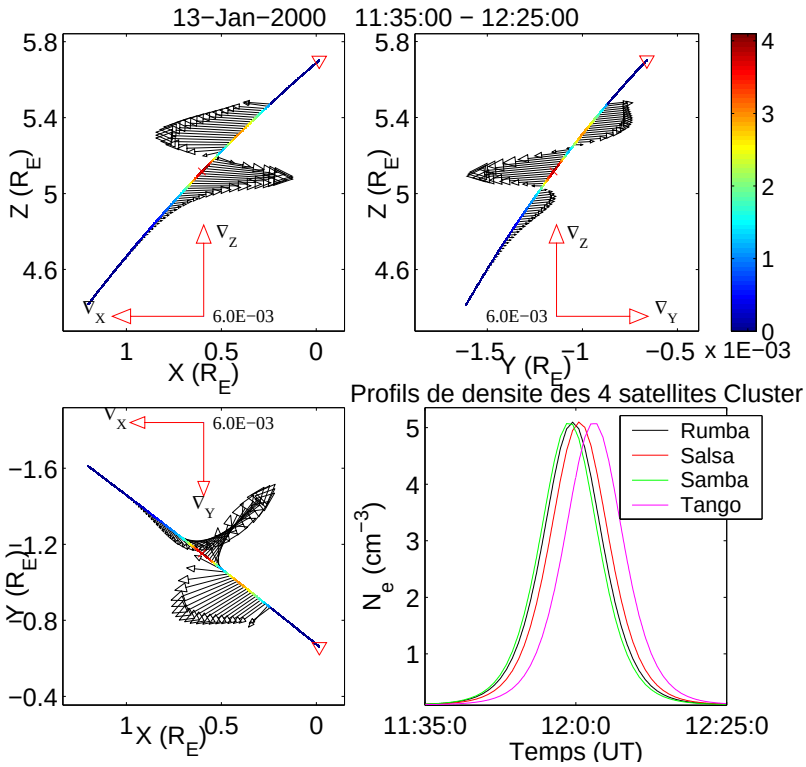

Figure 6.7: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une bulle de densité suivant le modèle de Harris parallèle à la direction Z, le 13 Janvier 2000, dans le cas d'une structure de taille plus grande que la distance de séparation des satellites.*

Les paramètres H_X, H_Y et H_Z correspondent à la demi-épaisseur de la bulle dans les directions X, Y et Z respectivement, et seront choisis pour cet exemple plus grands que la distance

de séparation S entre les quatre satellites (S = 1000 km, H = 3000 km). Afin de tester l'outil gradient, nous avons choisi une bulle de Harris parallèle à la direction Z (N_8 = 0). La Figure 6.7 représente les projections du gradient spatial, et on observe très clairement qu'il est dirigé uniquement dans les directions X et Y, sans composante dans la direction Z, ce qui montre à nouveau que dans le cas d'une structure plus grande que la distance de séparation entre les satellites, l'outil gradient spatial fonctionne correctement.

6.5 Applications

Après avoir décrit cette méthode multipoint et présenté ses limites et possiblités, nous allons maintenant en donner quelques exemples dans différentes régions de la magnétosphère en utilisant les données de la mission à quatre satellites CLUSTER. Dans cette partie, nous utiliserons uniquement des données de l'expérience WHISPER, la densité électronique, dont la méthode de détermination a été présentée dans le Paragraphe 2.3.1.

6.5.1 Magnétogaine: Ondes

Ce premier exemple se situe dans la magnétogaine (X = 6.9 R_E, Y = 18.1 R_E, Z = 0.5 R_E dans le système de coordonnées GSE), à 16:30 MLT, le 22 Décembre 2000 vers 17:15 UT (voir Figure 6.8). La distance de séparation entre les satellites est d'environ 600 km, alors que l'élongation est de l'ordre de 0.3 et la planéité d'environ 0.7. Les satellites observent une structure ondulatoire durant une dizaine de minutes (voir le profil de densité dans le panneau en bas à droite de la Figure 6.9). Les caractéristiques de cette onde sont les suivantes:
- longueur d'onde $\approx$ 4000 km;
- période $\approx$ 1 minute;
- vitesse du front d'onde $\approx$ 65 km/s.

Nous avons déterminé le gradient spatial de densité durant cet intervalle de temps et dessiné sa projection dans les plans XY, YZ et XZ GSE sur la Figure 6.9. On observe dans ce cas de données brutes non filtrées une variation très irrégulière du gradient, et il est difficile d'en conclure une tendance générale.

Afin d'obtenir des résultats plus probants, nous avons filtré les données de densité sur une bande de fréquence de 0.013 à 0.017 Hz, afin d'éliminer les petites variations et de retenir l'évolution globale de la densité durant la traversée de cette structure ondulatoire. Les résultats sont présentés sur la Figure 6.10. On observe que le gradient spatial change de direction régulièrement indiquant les traversées successives des fronts d'onde. Cet exemple nous montre la nécessité de regarder avec une grande attention les données initiales, car elles nécessitent parfois un certain filtrage afin de pouvoir appliquer l'outil gradient et ainsi d'obtenir des résultats utilisables.

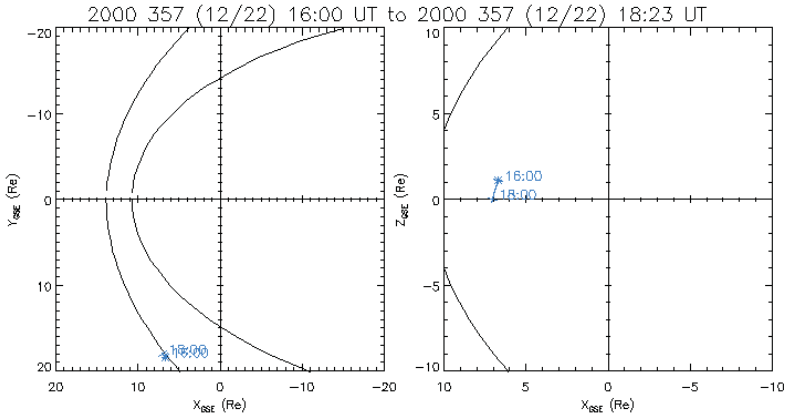

Figure 6.8: *Orbite des satellites CLUSTER durant la traversée d'une onde de plasma dans la magnétogaine le 22 Décembre 2000 entre 16:00 et 18:23 UT (D'après CDAWeb,* `http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/`*).*

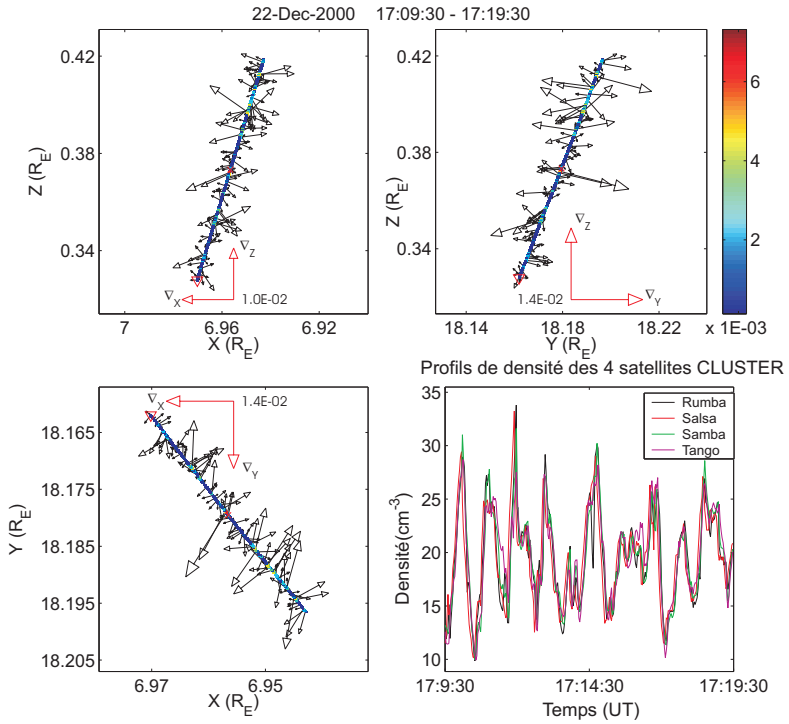

Figure 6.9: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure ondulatoire observée dans la magnétogaine le 22 Décembre 2000 (D'après Décréau et al. [2002]).*

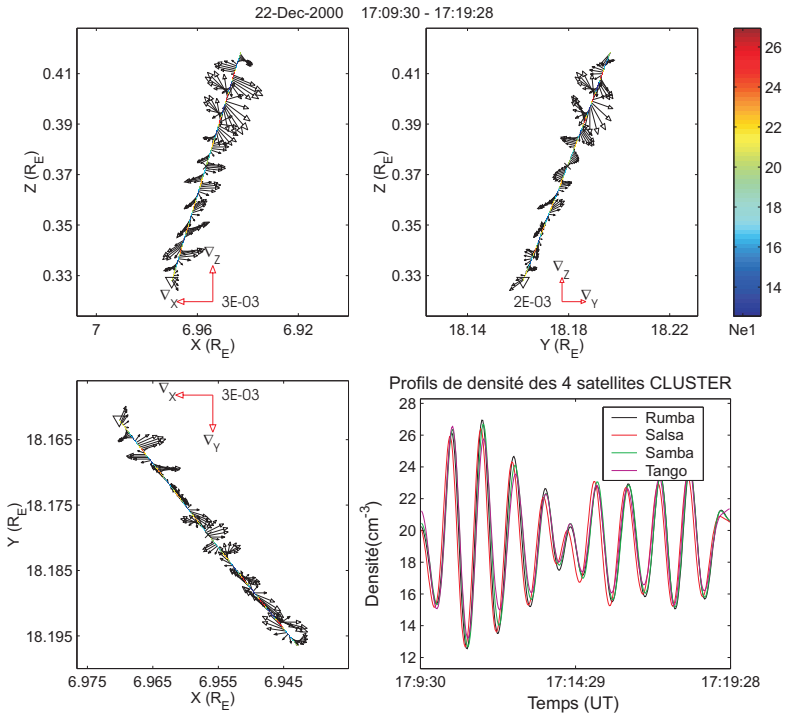

Figure 6.10: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure ondulatoire observée dans la magnétogaine le 22 Décembre 2000, après filtrage des données. Dans ce cas, l'échelle de couleur représente la variation de la densité de C1 le long de l'orbite du centre de masse des quatre satellites (D'après Décréau et al. [2002]).*

6.5.2 Magnétopause: Structure ondulatoire et orientation

6.5.2.1 16 Novembre 2001

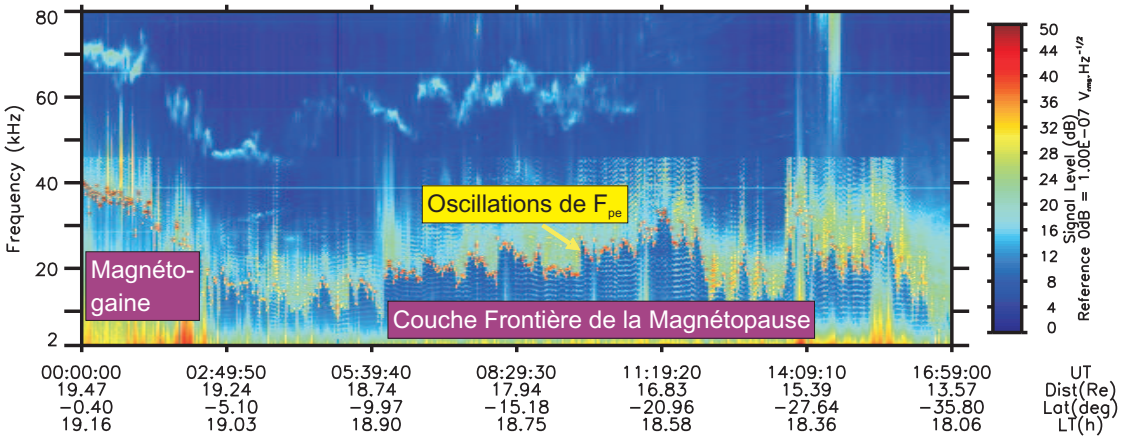

Figure 6.11: *Spectrogramme temps-fréquence WHISPER pour le 16 Novembre 2001 entre 00:00 et 17:00 UT, montrant une structure ondulatoire de grande longueur d'onde dans la couche frontière proche de la magnétopause (D'après Décréau et al. [2002]).*

Ce second exemple étudie une structure ondulatoire observée dans le secteur du crépuscule, le 16 Novembre 2001, à l'intérieur d'une épaisse couche frontière proche de la magnétopause. On peut voir cette structure sur un spectrogramme temps-fréquence de l'expérience WHISPER sur la Figure 6.11. Cet événement se déroule dans le cas d'une distance de séparation entre les quatre satellites CLUSTER assez importante, de l'ordre de 2000 km, et pour un tétraèdre ayant des paramètres caractéristiques permettant l'application de l'outil gradient spatial (P et $E < 0.3$). Les profils de densité correspondant à cette variation de densité sont représentés dans le panneau inférieur-droit de la Figure 6.12. On y distingue très bien la structure ondulatoire répétitive, durant plusieurs heures, avec une très large longueur d'onde. Le gradient, projeté dans les plans XY, XZ et YZ sur cette même figure sont très largement dans la direction de la magnétopause, ce qui semble indiquer que cette structure est reliée à celle-ci, ou du moins à sa couche frontière. L'ordre de grandeur du gradient est ici d'environ 1 $cm^{-3}/1000\ km$.

6.5.2.2 12 Décembre 2000

Cet événement se situe dans le secteur du crépuscule (17:45 MLT), au voisinage de la magnétopause, le 12 Décembre 2000, avec une distance de séparation entre les satellites CLUSTER d'environ 600 km (voir l'orbite des satellites CLUSTER sur la Figure 6.13). L'élongation du tétraèdre est d'environ 0.3, alors que la planéité est de l'ordre de 0.5, ce qui nous donne un tétraèdre relativement régulier.

La Figure 6.14 présente la traversée de deux éléments de plasma dans la couche frontière de la magnétopause, entre 12:35 et 12:40 UT. La partie supérieure de cette figure représente le spectrogramme temps-fréquence par WHISPER à bord de Salsa, et la partie inférieure le profil

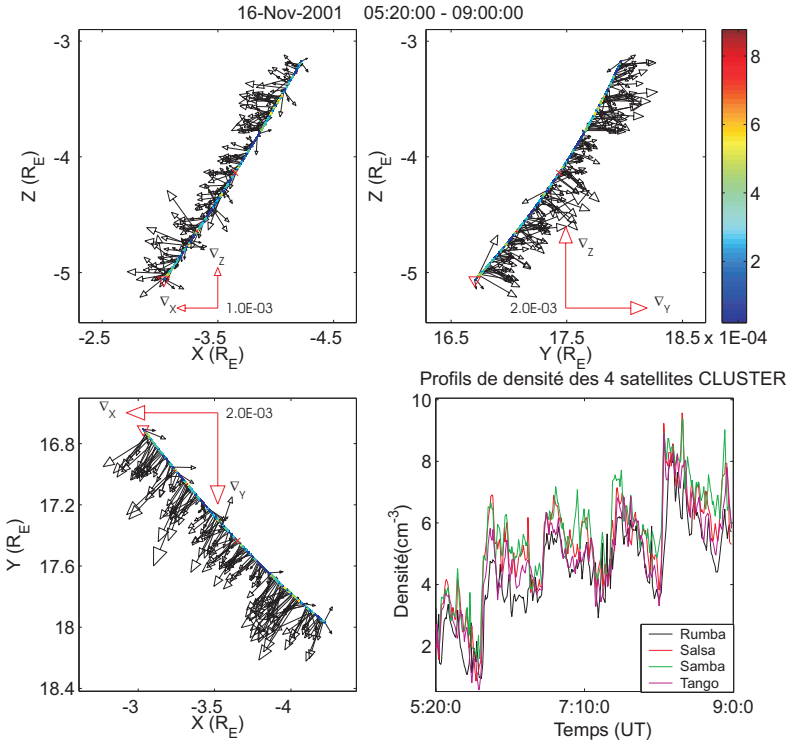

Figure 6.12: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une onde de plasma dans la couche frontière proche de la magnétopause le 16 Novembre 2001 (D'après Décréau et al. [2002]).*

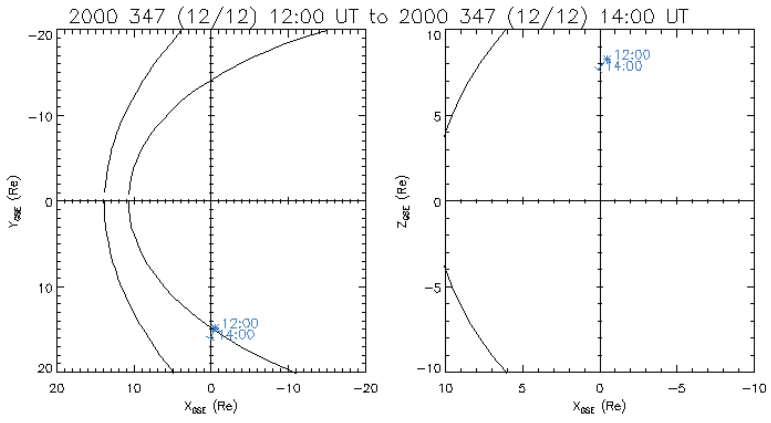

Figure 6.13: *Orbite des satellites CLUSTER durant la traversée de la magnétopause le 12 Décembre 2000 entre 12:00 et 14:00 UT (D'après CDAWeb,* `http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/`*).*

de densité pour les quatre satellites CLUSTER. Les quatre profils montrent des gradients très forts à chaque frontière des structures, mais également quelques différences entre les satellites. Par exemple, la durée de traversée de la première structure (vers 12:36:30 UT) est différente entre Salsa et Tango, alors qu'elle est du même ordre de grandeur pour la deuxième structure (vers 12:38:30 UT).

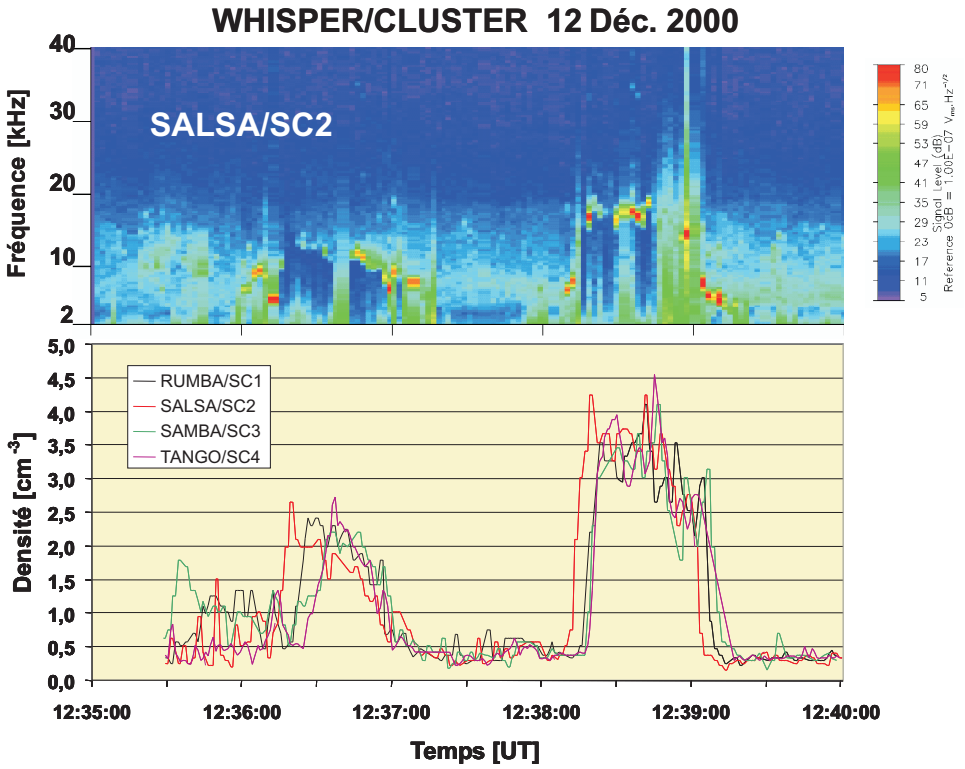

Figure 6.14: *Spectrogramme temps-fréquence de Salsa et profils de densité des quatre satellites CLUSTER, durant la traversée de deux éléments de plasma dans la couche frontière de la magnétopause, le 12 Décembre 2000 entre 12:35 et 12:40 UT, déterminés par l'instrument WHISPER (D'après Décréau et al. [2002]).*

On peut remarquer que les quatre satellites sont à chaque fois dans la même frontière en même temps; on peut donc appliquer la méthode du gradient spatial à ces structures de densité. Les résultats sont indiqués sur la Figure 6.15 pour la deuxième traversée. On voit immédiatement que la direction du gradient change entre l'entrée et la sortie de la structure: il est dirigé vers les X positifs, Y positifs et Z positifs quand les satellites entrent dans la structure, et dans l'autre sens quand ils en sortent. Comme l'ordre de traversée entre les satellites est le même entre l'entrée et la sortie, il est logique de trouver un gradient qui change de sens, étant donné qu'il est toujours dirigé vers la densité la plus forte. On remarque qu'il y a beaucoup de changements de la direction du gradient à l'intérieur de la structure. Cela est du aux nombreuses variations de densité entre les quatre satellites, qui ont pour conséquence que la condition d'homogénéité n'est plus vraiment satisfaite dans cette région.

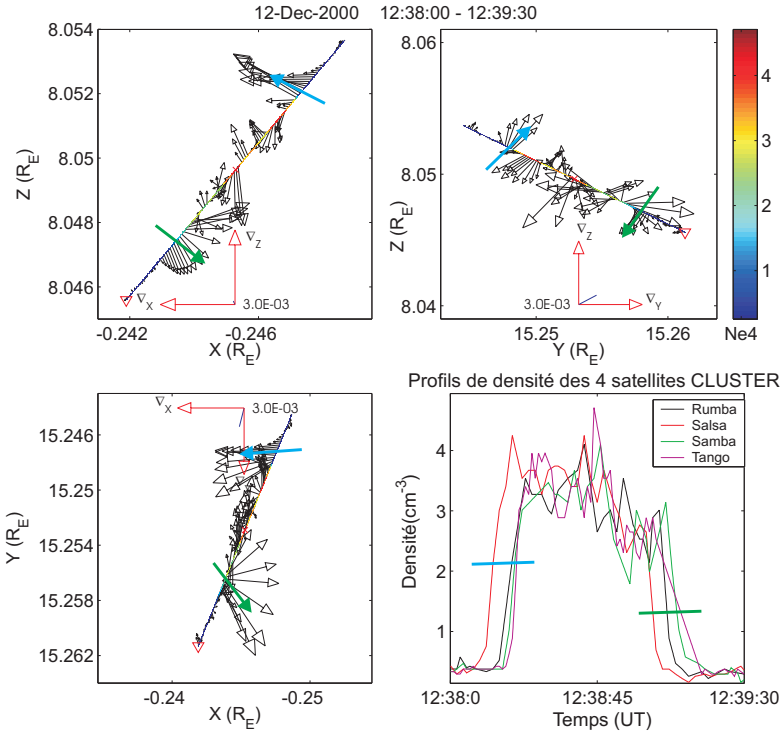

Figure 6.15: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'un élément de plasma dans la couche frontière de la magnétopause le 12 Décembre 2000. Les flèches bleues et vertes représentent les directions moyennes du gradient de densité aux instants définis par les segments bleus et verts indiqués dans le panneau en bas à droite (D'après Décréau et al. [2002]).*

CHAPITRE 7

Méthode des Délais

7.1 Méthode

Il existe une autre méthode d'analyse multipoint pouvant être appliquée aux données de la mission CLUSTER, il s'agit de la méthode des délais. Celle-ci permet de déterminer la vitesse d'une frontière dans sa direction normale. Pour cela, il est nécessaire de faire l'hypothèse suivante: la frontière doit être une surface plane P se déplaçant à vitesse constante V_N dans la direction de sa normale $\mathbf{n}$ (voir Figure 7.1). Si cette condition est satisfaite, la détermination des temps relatifs $t_{\alpha\beta}$ de traversée de cette frontière par les quatre satellites CLUSTER (α, β = 1,...,4), et la comparaison de ces temps avec les positions respectives des satellites $\mathbf{r}_{\alpha\beta}$ nous donne la direction normale $\mathbf{n}$ de la frontière considérée et le module de la vitesse V_N dans la direction normale par la relation suivante:

$$\boldsymbol{r_{\alpha\beta}} \cdot \frac{1}{V_N} \mathrm{n} = t_{\alpha\beta} \tag{7.1}$$

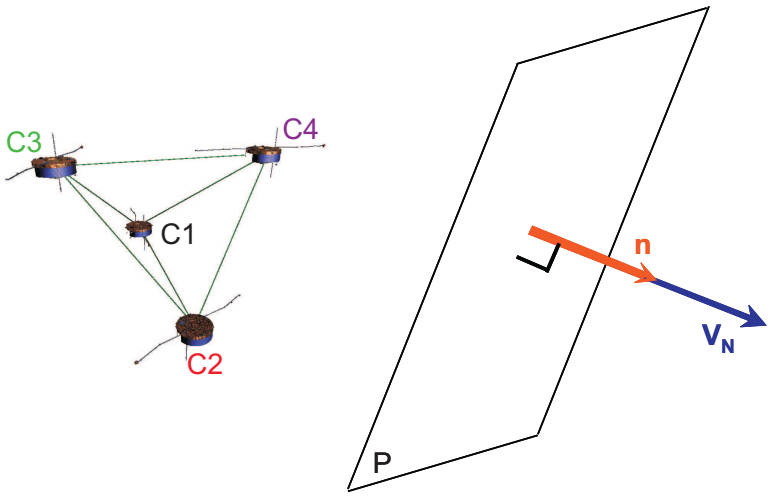

Figure 7.1: *Représentation schématique d'une frontière plane P traversant les quatre satellites CLUSTER disposés en tétraèdre.*

Cette méthode a déjà été utilisée dans le passé avec quatre satellites différents, mais elle avait montré des limites, qui n'existent plus avec CLUSTER: la compatibilté des instruments positionnés sur des satellites différents, et la difficulté de trouver des conjonctions permettant

l'application d'un tel outil (par exemple, Russell et al. [1983] n'avaient trouvé que quatre événements sur un intervalle de temps de 2 ans). Avec la mission CLUSTER, les instruments sont absolument identiques, et il est très facile de trouver de bonnes conjonctions.

Cette méthode est appliquée ici à des traversées de frontières magnétosphériques, telles que la magnétopause ou à des structures de densités, par exemple dans la plasmasphère. Un exemple de traversée de magnétopause est donné dans le paragraphe suivant.

7.2 Applications

7.2.1 26 Février 2001

Le 26 Février 2001, vers 06:00 UT, dans le secteur de 12:00 MLT, les quatre satellites CLUSTER traversent plusieurs fois une couche frontière durant un intervalle de temps d'environ 15 minutes. Des spectrogrammes temps- fréquence déterminés par l'instrument WHISPER durant cette traversée sont représentés sur la Figure 2.10 dans le Chapitre 2. La distance de séparation moyenne entre les satellites est de l'ordre de 600 km, alors que les paramètres caractéristiques du tétraèdre sont relativement petits sur cet intervalle de temps ($E < 0.3$ et $P < 0.2$), ce qui nous indique que le tétraèdre est régulier pour cet événement. L'instrument WHISPER permet de déterminer la fréquence plasma électronique, qui est tracée en fonction du temps sur la Figure 7.2. On peut observer que les satellites traversent une première structure (frontières 1 et 2), puis une deuxième (frontières 3 et 4), et sortent enfin définitivement de la magnétosphère (frontière 5). Les profils de densité étant assez semblables entre les quatre satellites, nous avons une bonne corrélation temporelle et il est ainsi possible d'appliquer l'outil délai temporel et d'en déduire la vitesse normale de ces cinq frontières. La corrélation spatiale étant également satisfaite (distance de séparation inférieure à la taille caractéristique de la structure), nous pouvons également déterminer le gradient spatial de densité de ces différentes traversées.

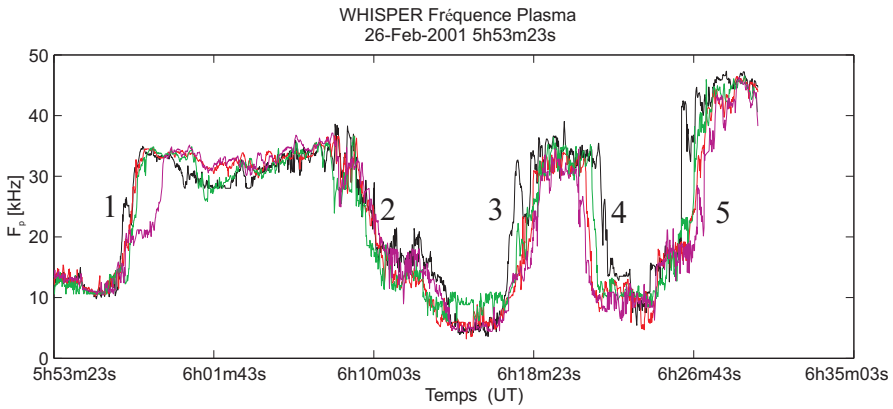

Figure 7.2: *Profils de la fréquence plasma en fonction du temps déterminés par les quatre instruments WHISPER durant la traversée de la couche frontière de la magnétopause le 26 Février 2001 (D'après Décréau et al. [2002]).*

Concernant la traversée de la première structure, le gradient de densité est projeté dans les trois plans XY, XZ et YZ dans le système de coordonnées GSE sur la Figure 7.3. La direction de la vitesse normale est également indiquée sur la figure par des flèches bleues et vertes aux instants de traversées des deux frontières. On s'aperçoit que la frontière se déplace dans une direction opposée au mouvement des satellites (vers les X, Y et Z positifs), avec une magnitude de l'ordre de 9 km/s. La direction de déplacement est à peu près la même pour les deux frontières, ce qui laisse à penser qu'il s'agit d'une structure de densité détachée de la magnétopause et qui se déplace vers l'intérieur de la magnétosphère. On remarque que généralement l'accord est bon entre les directions de vitesse normale de frontière et la direction du gradient de densité (en notant que le gradient est toujours dirigé vers les densités les plus fortes, ce qui explique les directions opposées).

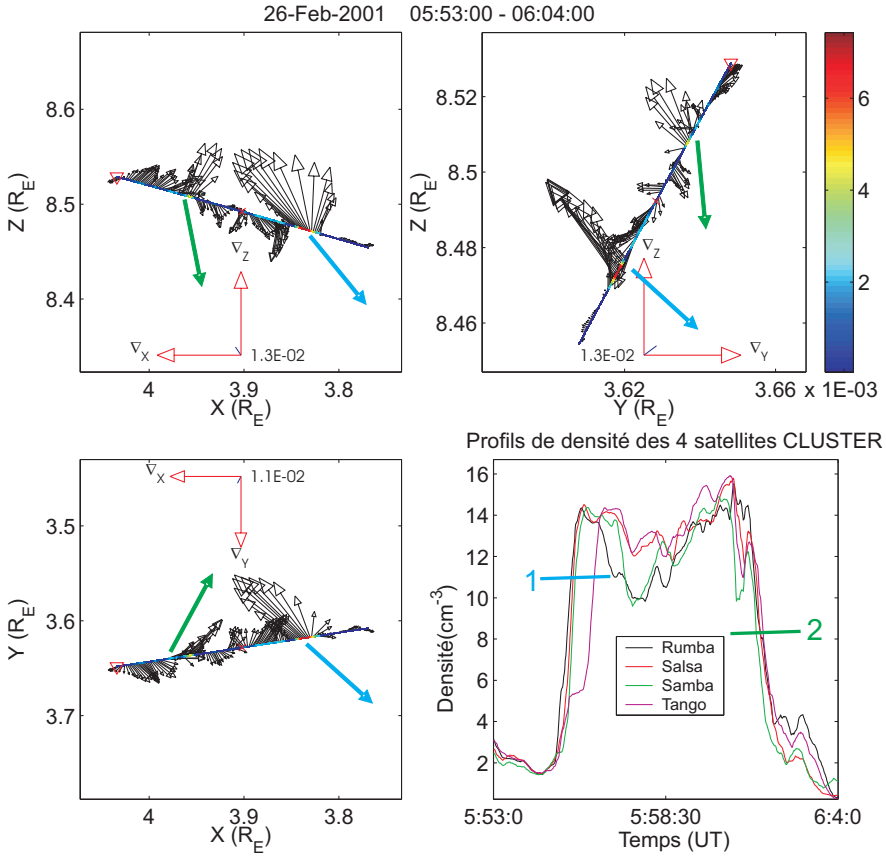

Figure 7.3: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure de densité le 26 Février 2001. Les flèches bleues et vertes représentent les directions moyennes de la normale aux instants définis par les segments bleus et verts indiqués dans le panneau en bas à droite (D'après Décréau et al. [2002]).*

Dans le cas de la deuxième structure (voir Figure 7.4), la vitesse change de direction entre la frontière entrante et la frontière sortante, avec une magnitude de l'ordre de 20 km/s. Cela signifie que cette structure a effectué un mouvement d'aller-retour entre l'entrée et la sortie de

cette structure. Les résultats sur les vitesses sont également en bon accord avec ceux concernant le gradient de densité.

Quand à l'entrée définitive dans la magnétogaine (frontière 5 sur la Figure 7.4), on note qu'elle correspond à un déplacement de la magnétopause dans la direction opposée à la trajectoire des satellites. En conclusion, on observe que les directions des vitesses normales de frontières changent alternativement de direction (voir Figure 7.5), ce qui pourrait s'expliquer par une expansion de la magnétosphère, puis une contraction, et cela répeté plusieurs fois. Ces résultats sont en accord avec ceux de Taylor et al. [2004], utilisant différents instruments à bord de CLUSTER.

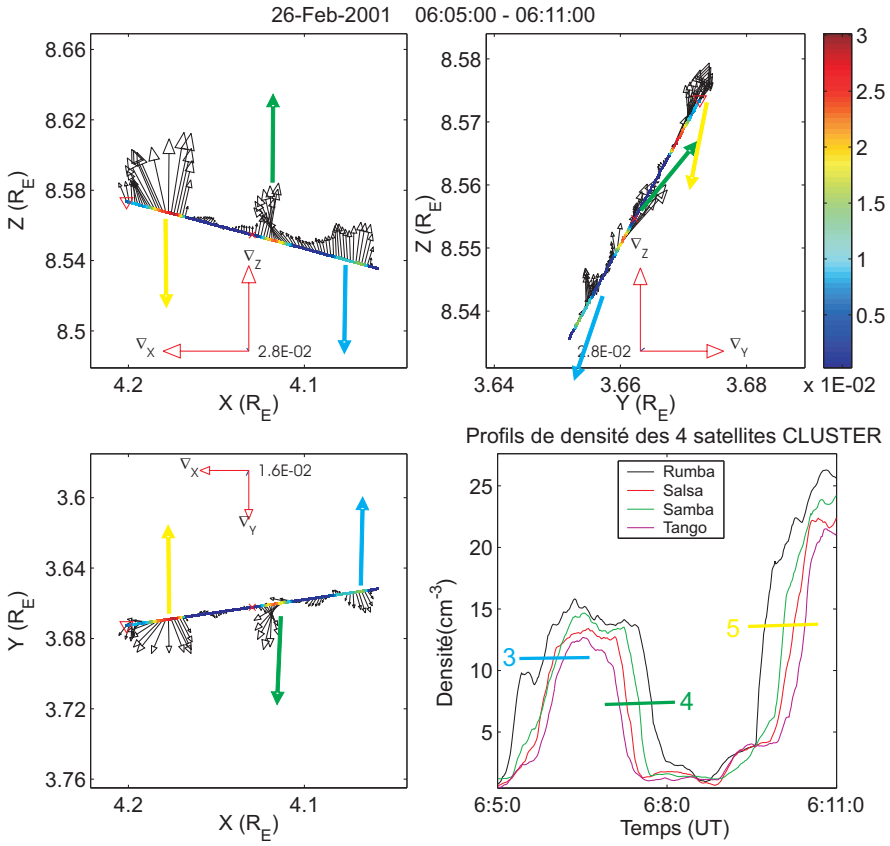

Figure 7.4: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure de densité et de la magnétopause le 26 Février 2001. Les flèches bleues, vertes et jaunes représentent les directions moyennes de la normale aux instants définis par les segments bleus, verts et jaunes indiqués dans le panneau en bas à droite (D'après Décréau et al. [2002]).*

7.2.2 2 Mars 2002

Ce second événement consiste en la traversée d'une magnétopause par les 4 satellites CLUSTER le 2 Mars 2002 vers 03:30 UT, dans le cas d'une petite distance de séparation (environ 100

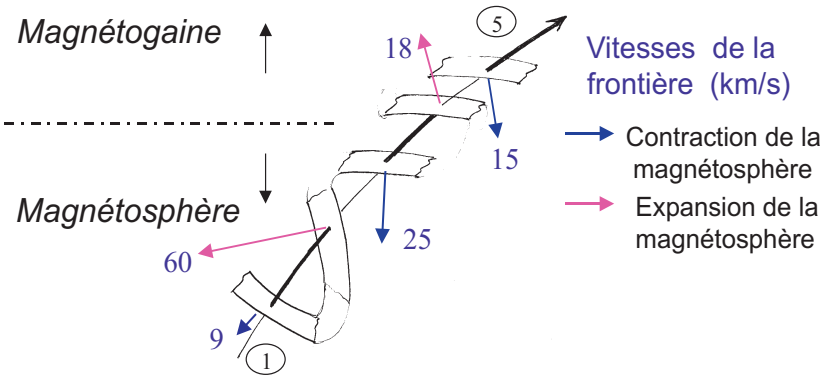

Figure 7.5: *Orientation des structures de densité traversées par les satellites CLUSTER le 26 Février 2001 (D'après Décréau et al. [2002]).*

km) et pour les paramètres décrivant la forme du tétraèdre avec des valeurs satisfaisantes ($E \approx$ 0.2 et $P \approx 0.6$). Ce passage se situe dans le secteur de midi, à haute latitude (X = 7.2 R_E, Y = 3.3 R_E, Z = 8.4 R_E en GSE), à plus exactement 11:40 MLT (voir Figure 7.6).

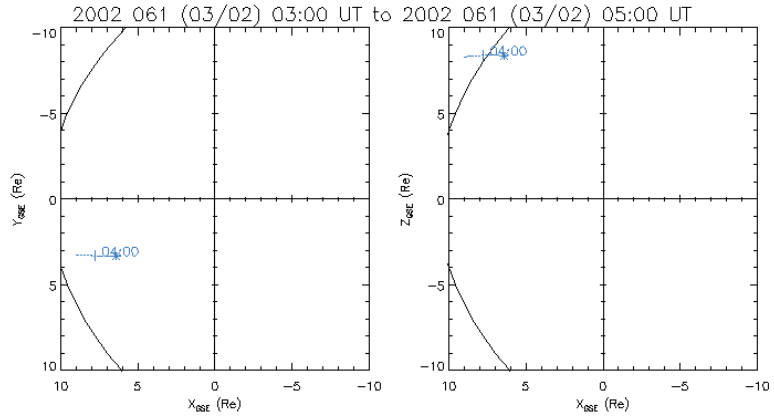

Figure 7.6: *Orbite des satellites CLUSTER durant la traversée de la magnétopause le 2 mars 2002 (D'après CDAWeb,* `http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/`*).*

Les spectrogrammes temps-fréquence déterminés par l'instrument WHISPER et représentés sur la Figure 7.7 indiquent une signature très claire de traversée de magnétopause, avec l'augmentation rapide de la fréquence plasma d'environ 10 à 40 kHz. Les profils de densité correspondant pour les quatre satellites sont représentés en bas à droite de la Figure 7.8, et les projections du gradient dans les trois autres panneaux. Les quatre satellites sont très proches les uns des autres, et ainsi la condition de corrélation spatiale est totalement satisfaite, ce qui permet le calcul du gradient spatial de densité pour cet événement.

Le vecteur gradient a les composantes moyennes suivantes durant la traversée de la magnétopause (vers 03:31 UT): [3.5 10^{-2}, $-1.5\ 10^{-2}$, 5.4 10^{-2}] $cm^{-3}km^{-1}$, et une valeur moyenne de 7 10^{-2} $cm^{-3}km^{-1}$. Il est dans la direction anti-parallèle à la vitesse normale de cette frontière, que l'on peut calculer avec la méthode des délais et qui est d'environ 33 km/s [-18, 3, -28]. En

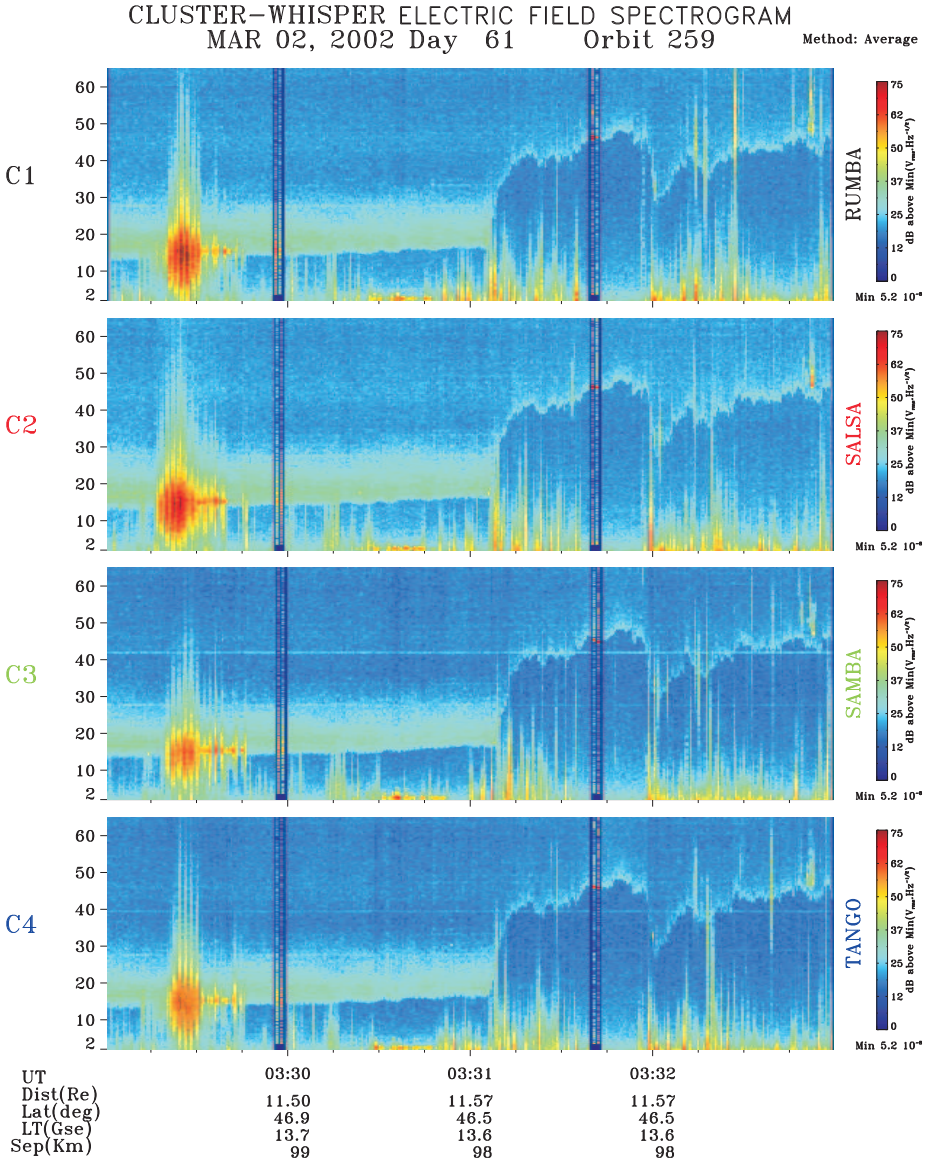

Figure 7.7: *Spectrogrammes temps-fréquence durant la traversée de la magnétopause du 2 Mars 2002 entre 03:29 et 03:33 UT déterminés par l'instrument WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER. Les paramètres d'orbite sont ceux de C4 (D'après Décréau et al. [2002]).*

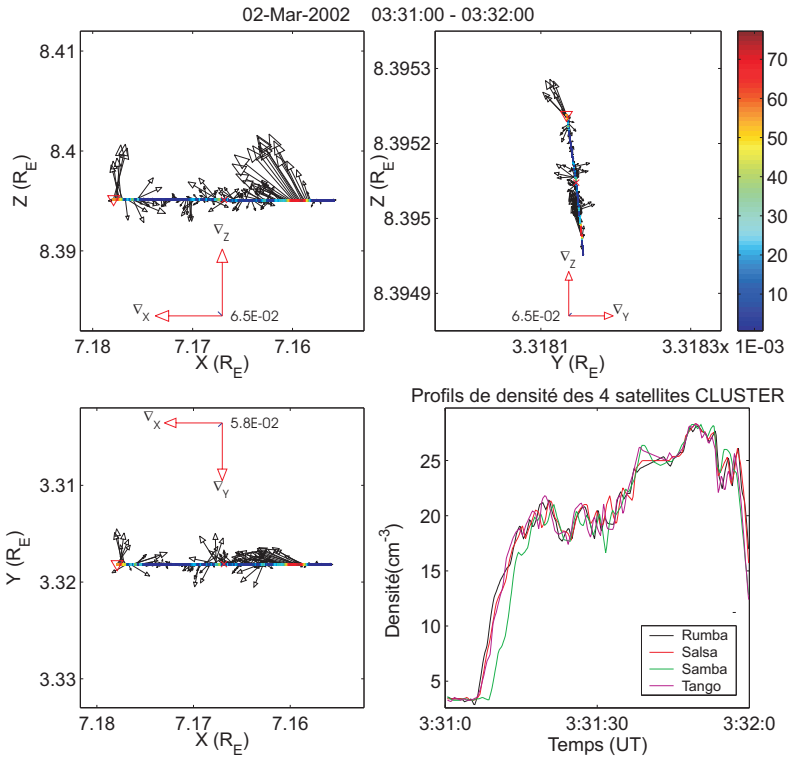

Figure 7.8: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée de la magnétopause le 2 Mars 2002. (D'après Décréau et al. [2002]).*

faisant l'hypothèse d'une frontière à une dimension se déplaçant à une vitesse constante, nous pouvons reconstruire le profil de la magnétopause en fonction de la distance des satellites dans la direction normale à la frontière, comme sur la Figure 7.9. La pente déduite du profil moyen de la traversée est de l'ordre de 0.07 $cm^{-3}km^{-1}$; ce qui correspond à la valeur moyenne du gradient instantané déterminé précédemment et dessiné sur la Figure 7.8. Cela nous indique que cette frontière est bien une structure 1-D. Nous pouvons également en déduire l'épaisseur de cette magnétopause, qui est ici d'environ 150 km, ce qui est relativement petit par rapport à des études précédentes utilisant d'autres données de la mission CLUSTER [Dunlop et al., 2006].

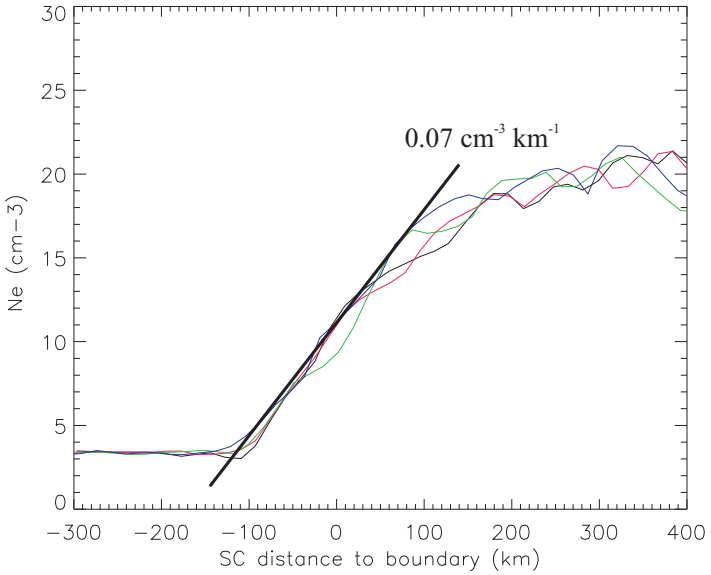

Figure 7.9: *Profil de densité de la magnétopause en fonction de la distance à cette frontière, le 2 Mars 2002 entre 03:31 et 03:32 UT (D'après Décréau et al. [2002]).*

CHAPITRE 8

Analyse Statistique

8.1 Généralités - Méthode

Depuis les débuts de l'aventure spatiale, des statistiques d'observations de la magnétosphère ont toujours été réalisées. En effet, cela permet d'avoir une vue d'ensemble d'une région, d'un type particulier de particules, ou d'une sorte d'onde électromagnétique. Cela permet notamment de comparer différentes études effectuées avec différents satellites, ou différentes approches statistiques. En outre, elles peuvent permettre de créer des modèles empiriques, qui sont d'une grande utilité dans l'étude globale de la magnétosphère. Ainsi les modèles de champ magnétique créés par N. A. Tsyganenko sont très couramment utilisés, notamment dans la suite de cette étude [Tsyganenko et Stern, 1996].

Dans le cadre de la mission CLUSTER, il est clair que la présence de quatre satellites n'offre pas d'information supplémentaire déterminante, mais elle permet un meilleur échantillonnage d'une région et une meilleure couverture des conditions géophysiques. Nous allons présenter ici en guise d'exemple une étude effectuée à l'aide d'une mission composée d'un seul satellite, Viking, tout en gardant à l'esprit que le but est d'effectuer ensuite le même type d'analyse statistique avec les données de la mission CLUSTER, ce que nous avons déjà commencé.

8.2 Application

8.2.1 Introduction: Le projet SEVEM

Alors qu'il existe des modèles empiriques de distribution des électrons et des protons dans la magnétosphère créés par la NASA [Sawyer et Vette, 1976; Vette, 1991], il n'existe pas de modèle global des ondes ELF[1] et VLF[2] dans la magnétosphère. C'est pourquoi, le projet SEVEM ("Survey of ELF and VLF Experiments in the Magnetosphere") a été initié à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, afin de servir de support aux efforts de modélisation des ondes ELF et VLF dans la magnétosphère, efforts entamés par le vote d'une recommendation par la Commission H de l'URSI (Union Radio-Scientifique Internationale) en 1999. Nous avons tout d'abord créé un site web afin de recueillir toutes les informations nécessaires à l'élaboration de tels modèles: `http://www.oma.be/sevem/` [Darrouzet et al., 2001b]. Dans ce site, il est possible de trouver l'ensemble des missions scientifiques ayant effectué ou effectuant encore

[1] Anglais: Extremely Low Frequency

[2] Anglais: Very Low Frequency

aujourd'hui des mesures d'ondes électromagnétiques dans la magnétosphère. Pour chacune de ces missions, des informations sur la mission, l'orbite du satellite, les instruments de mesure ainsi que la disponibilité et le format des données scientifiques sont fournies. Des informations bibliographiques sur les missions et les résultats obtenus sont également indiquées. En outre, ce site web donne des informations sur les modèles déjà existant, et sur d'autres projets reliés aux mesures d'ondes ELF et VLF. En effet, plusieurs recherches indépendantes ont été effectuées dans le but de progresser vers une cartographie globale de ces ondes dans la magnétosphère, et ce site permet d'avoir une vision globale de ce qui a été fait dans ce domaine, et de ce qui reste à faire. Nous pouvons par exemple citer les travaux de Tsurutani et Smith [1977] avec la mission OGO-5, Parrot [1990] avec AUREOL-3, Erlandson et Zanetti [1998] avec Freja, Green et Boardsen [1999] avec Hawkeye-1, Lakhina et al. [2000] avec Geotail, Fraser et Nguyen [2001] et Meredith et al. [2001, 2003, 2004] avec CRRES, Kasahara et al. [2001] avec EXOS-D, Erlandson et Ukhorskiy [2001] et André et al. [2002] avec Dynamics Explorer 1 ou Darrouzet et al. [2003] avec Viking. Cette dernière étude statistique des ondes VLF est détaillée dans les paragraphes suivants.

8.2.2 Données de la mission Viking

Les données fournies entre Mars et Décembre 1986 par l'expérience onde V4H à bord du satellite Viking [Hultqvist, 1990] ont été utilisées afin de créer un premier modèle statistique des ondes VLF (entre 10 et 46 kHz) dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, approximativement la zone aurorale Nord. Il est d'un grand intérêt de fabriquer des modèles des ondes électromagnétiques à basses fréquences dans ces zones aurorales, car elles jouent un rôle important dans ces régions et peuvent être utilisées pour caractériser le niveau d'activité dans la magnétosphère. Ainsi, à moyennes latitudes, les ondes ELF et VLF sont connues pour disperser les électrons énergétiques piégés et éventuellement les précipiter dans l'atmosphère de la Terre, où ils peuvent altérer la propagation des ondes radios.

L'instrument V4H à bord du satellite Viking mesure principalement deux composantes du champ électrique à l'aide de deux antennes dipolaires de 80 m situées dans le plan perpendiculaire à l'axe de dotation du satellite [Bahnsen et al., 1988]. Nous n'avons utilisé ici qu'une seule composante car la seconde était fortement perturbée et bruitée (voir une description plus complète des données dans le Chapitre 3.2). Nous avons utilisé ici les densités de puissance spectrale, données que nous avons récupérées sur le site web du CDPP (Centre de Données de la Physique des Plasmas: `http://cdpp.cesr.fr/`) [Darrouzet et Lemaire, 2002]. Sous cette forme, ces données sont comparables à celles d'études statistiques similaires. On peut citer l'évaluation des coefficients de diffusion radiale dans les ceintures de radiation de la Terre [Arthur et al., 1978; Lanzerotti et al., 1978].

La Figure 8.1 donne un exemple des observations de V4H durant 15 minutes de mesure. Durant les 10 mois considérés dans notre étude, il y a eu plusieurs orages et sous-orages magnétiques. Les données ont donc été collectées sur une grande gamme de conditions géomagnétiques, comme indiqué sur la Figure 8.2, donnant l'histogramme des indices K_p durant la période concernée. Cette distribution nous indique que les valeurs de $K_p < 3$ (faible activité géomagnétique) sont dominantes. Il y a cependant quelques jeux de données avec des $K_p > 5$.

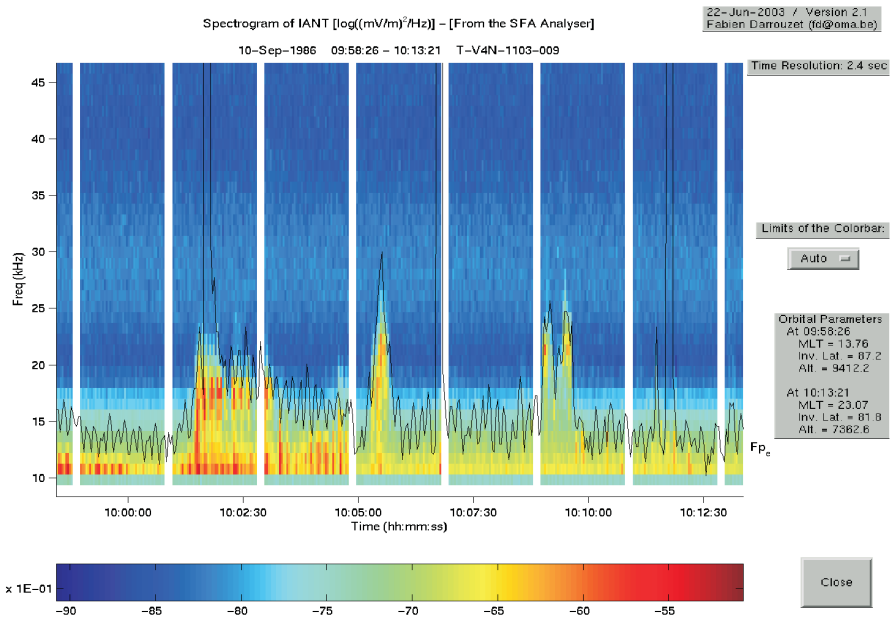

Figure 8.1: *Spectrogramme temps-fréquence de l'instrument V4H à bord du satellite Viking le 10 Septembre 1986 entre 09:58 et 10:13 UT et entre 10 et 46 kHz. Des paramètres d'orbite sont indiqués sur la droite de la figure.*

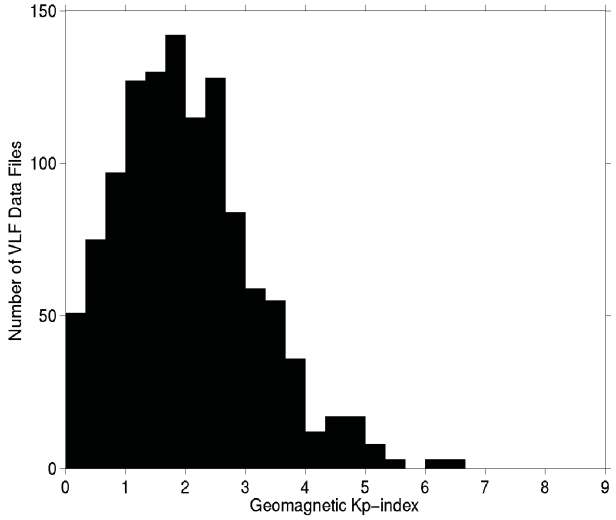

Figure 8.2: *Indice d'activité géomagnétique K_p par fichier de données de 15 minutes durant les 10 mois de cette étude.*

La distribution en temps magnétique local (MLT) n'est également pas optimale, car cette étude n'a été effectuée que sur une période de 10 mois consécutifs et uniquement dans l'hémisphère Nord, ce qui ne permettait pas une couverture globale de tous les temps locaux (voir Figure 8.3).

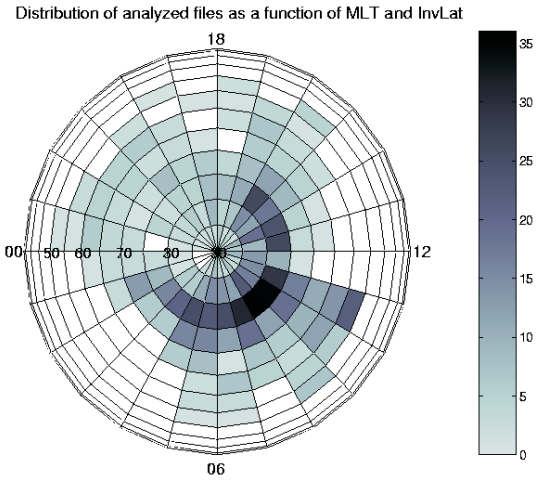

Figure 8.3: *Distribution en temps magnétique local (MLT) et latitude invariante (InvLat) des fichier de données de 15 minutes durant les 10 mois de cette étude. L'échelle de couleur représente le nombre de passages du satellite Viking dans la boite statistique MLT/InvLat.*

Les données ont été placées dans des boites statistiques dépendantes du temps magnétique local (MLT = $0-24$ heures), de la latitude invariante (InvLat = $50-90°$) pour différentes altitudes (Alt = $1500-13500\ km$) et bandes de fréquence (Freq = $10-46\ kHz$). Différentes caractéristiques ont été observées en fonction de ces différents paramètres.

Afin d'évaluer la distribution statistique de nos données, et d'ainsi valider notre étude, nous avons regardé la distribution des données à l'intérieur d'une boite statistique. Ensuite, nous avons comparé cette distribution avec les distributions classiques de Poisson et de Gauss, et constaté que notre jeu de données suivait raisonablement bien ces distributions (voir un exemple précis sur la Figure 8.4). Cela signifie que notre échantillon est homogène, et que notre étude statistique est valide, du moins lorsque le nombre de données par boite est supérieur à 10000, ce qui est le cas de la plupart des boites.

8.2.3 Résultats statistiques

8.2.3.1 Dépendance en latitude invariante

La dépendance en latitude invariante (InvLat) est analysée en regardant la distribution des densités spectrales de puissance du champ électrique mesurées à bord de Viking dans tous les secteurs MLT en fonction de la fréquence, dans des boites de $10°$ de latitude invariante et de $\pm$ 1500 km d'altitude (voir Figure 8.5). A basse latitude invariante ($50-60°$) et moyenne altitude

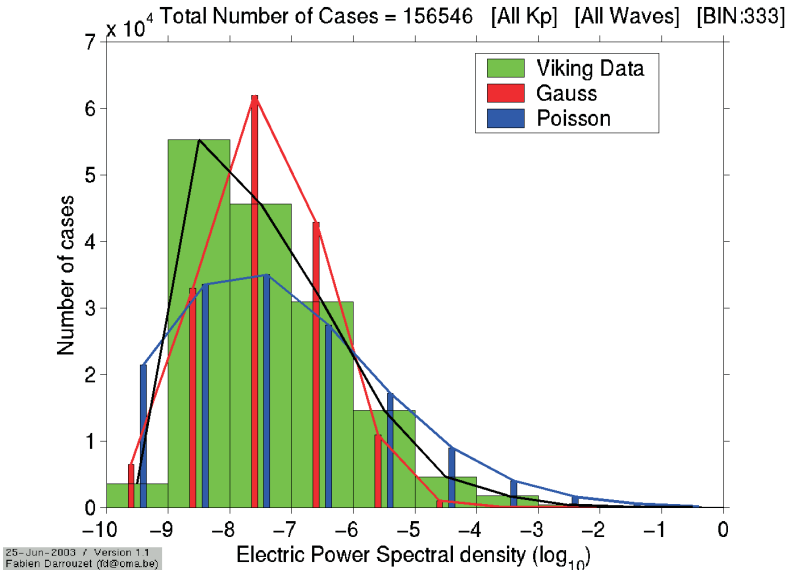

Figure 8.4: *Histogramme de la densité spectrale de puissance à l'intérieur d'une boite statistique.*

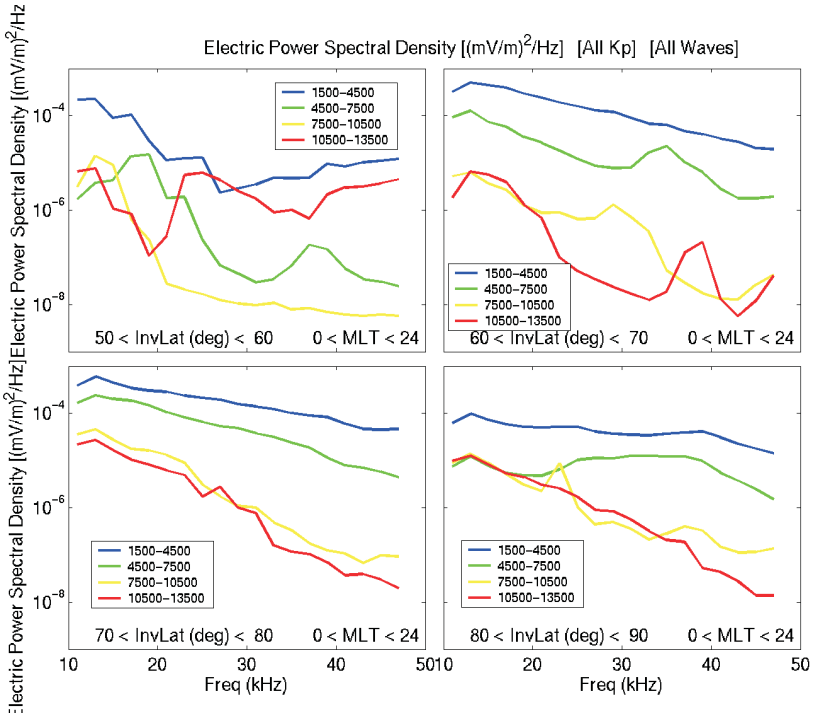

Figure 8.5: *Densités de puissance spectrale du champ électrique VLF en fonction de la fréquence (10−46 kHz) et moyennées sur l'ensemble des temps magnétiques locaux (MLT) pour différentes latitudes invariantes (± 5°) et différentes altitudes (± 1500 km). Les données couvrent la période Mars-Décembre 1986 et proviennent de l'instrument V4H à bord du satellite Viking.*

(4500−10500 km), on observe que l'intensité des ondes devient nettemment plus basse au-dessus de 25 kHz. Cela change entre 60 et 80°, où la distribution des données à basse altitude suit une loi de puissance dans toute la gamme de fréquence. Par contre, à très hautes latitudes ($>$ 80°), les spectres s'applatissent entre 15 et 35 kHz. Certaines courbes sont très irrégulières, notamment à basse latitude, en raison du moins grand nombre de données dans ces régions.

8.2.3.2 Dépendance en temps magnétique local

Il est raisonnable d'attendre des variations en temps magnétique local (MLT) de l'intensité des ondes VLF en raisons des émissions magnétosphériques différentes dans chaque MLT (comme les interactions onde-particules dans les régions aurorales ou les ondes dans les cornets polaires ou à la magnétopause), mais aussi en fonction des contributions dues aux émissions humaines (les émetteurs VLF par exemple). Les quatre panneaux de la Figure 8.6 illustrent les variations en MLT des ondes mesurées par V4H dans les secteurs de minuit (21:00−03:00 MLT), de l'aurore (03:00−09:00 MLT), de midi (09:00−15:00 MLT), et du crépuscule (15:00−21:00 MLT). Dans chaque panneau, nous avons tracé les intensités du champ électrique pour 4 niveaux d'altitude ($\pm$1500 km) et pour toutes les latitudes invariantes disponibles dans cette étude. Nous remarquons que les ondes VLF sont plus intenses dans le secteur de minuit et à basse altitude, $<$ 7500 km, alors qu'elle sont les plus faibles du côté jour, particulièrement à haute fréquence. Les données du secteur de l'aurore nous montrent que les intensités sont beaucoup plus uniformément distribuées dans ce secteur que dans les autres, et qu'elles suivent grossièrement une loi de puissance entre 10 et 40 kHz. Il y a une remarquable différence entre le secteur de minuit et les autres, indiquant une forte différence par rapport à l'altitude uniquement dans ce secteur. Cependant, excepté du côté jour, il semble que l'intensité des ondes diminue globalement avec l'altitude.

8.2.3.3 Dépendance en fréquence

Après avoir observé une variation significative de l'intensité des ondes électriques VLF avec l'altitude, le temps magnétique local et la latitude invariante, nous voyons également une dépendance significative de la puissance en fonction de la fréquence. La Figure 8.7 nous donne la distribution de l'intensité dans l'ensemble des secteurs MLT, pour 4 bandes de fréquence et en fonction de la latitude invariante et de l'altitude (boites de 2°$\times$500 km). Entre 10 et 19 kHz, les ondes les plus intenses se trouvent aux plus basses altitudes (1500−3500 km) et aux plus basses latitudes invariantes (54−60°). Cette tendance se décalle vers les plus hautes altitudes à mesure que l'on va vers de plus grandes latitudes invariantes. Cette tendance apparait plus faible et les puissances plus basses, lorsque de plus hautes fréquences sont considérées. Par exemple, entre 19 et 28 kHz et pour des fréquences supérieures à 37 kHz, les ondes sont principalement présentes vers 66−80° de latitude invariante et autour de 2500−4500 km.

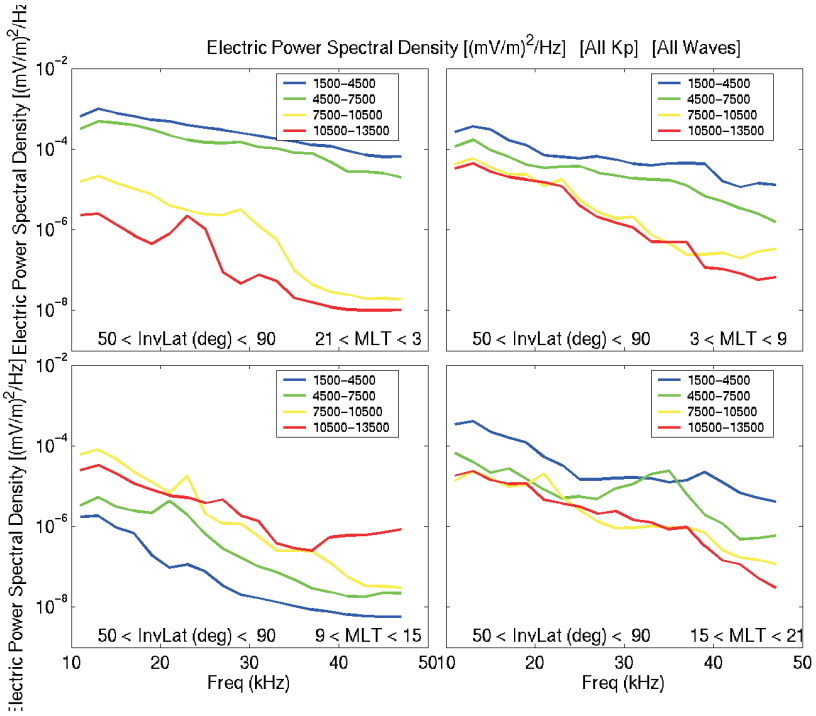

Figure 8.6: *Densités de puissance spectrale du champ électrique VLF en fonction de la fréquence (10−46 kHz) et moyennées sur l'ensemble des latitudes invariantes pour différents temps magnétiques locaux (± 3 heures) et différentes altitudes (± 1500 km).*

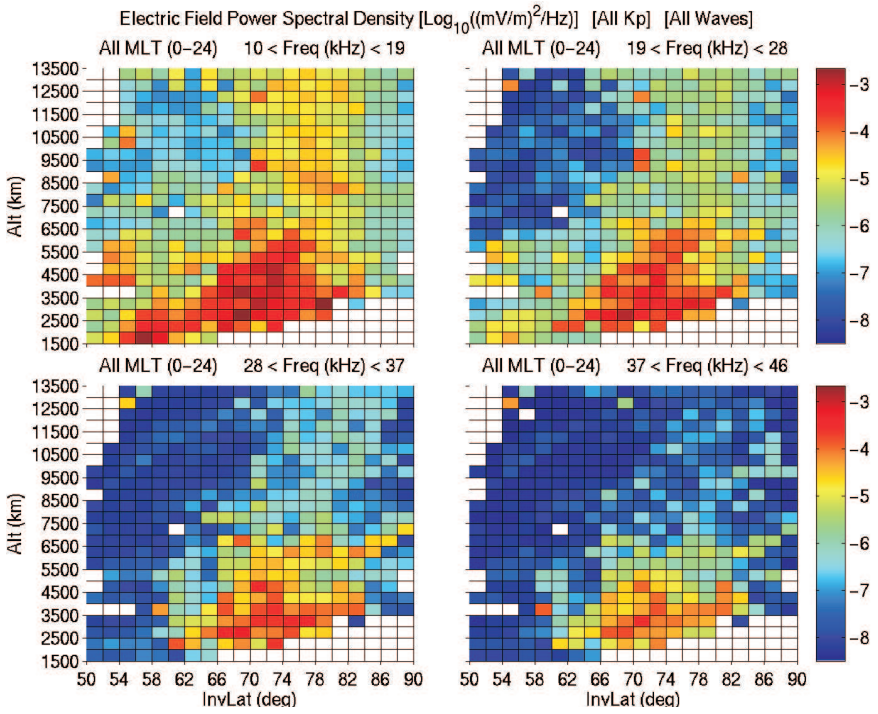

Figure 8.7: *Densités de puissance spectrale du champ électrique VLF en fonction de la latitude invariante et de l'altitude (boites de $2^\circ \times 500\ km$), moyennées sur l'ensemble des temps magnétiques locaux et pour différentes bandes de fréquences ($\pm$ 4.5 kHz).*

8.2.3.4 Conclusion

Cette étude statistique des densités de puissance spectrale du champ électrique dans le domaine des VLF nous a permis de détecter des variations systématiques de l'intensité des ondes. Nous avons trouvé les ondes les plus intenses à basse fréquence ($10-19\ kHz$) et à relativement basse altitude ($1500-5500\ km$). Il semble qu'il y ait beaucoup moins d'ondes VLF au dessus de 6000 km, et que les ondes les moins intenses soient observées du côté jour, entre 09:00 et 15:00 MLT. Cette étude préliminaire a permis de dégager des premières tendances, mais en raison de la couverture limitée de cette base de données, il est encore un peu tôt pour essayer de corréler ces résultats avec des fonctions analytiques dans le but de créer un modèle empirique de ces ondes. Cela pourra être fait lorsque cette étude sera complétée par l'analyse des données fournies par les expériences ondes se trouvant à bord des quatre satellites CLUSTER: WHISPER [Décréau et al., 1997] et STAFF [Cornilleau-Wehrlin et al., 1997]. En effet, l'orbite de cette mission se situe à plus haute altitude, et la couverture de ces mesures d'ondes est totale depuis Juillet 2002. Par ailleurs, l'instrument WHISPER possède une résolution en fréquence supérieure à celle de Viking (163 Hz). Une première étude a été commencée en analysant les données WHISPER dans le cas d'orages magnétiques (voir une présentation disponible à cette adresse: `http://www.oma.be/plasmasphere/Articles_PDF/Meeting_LPCE_NTC_06_07APR2004/2004Apr_Orleans_Continuum_Benck.pdf`). Par ailleurs, une mission française récente, DEMETER [Parrot et al., 2006], mesure les six composantes du champ électromagnétique dans le domaine de fréquence ELF et VLF à basse altitude. Ce micro-satellite est particulièrement dédié pour effectuer ce type de mesures de manière continue, et celles-ci seront donc également utilisées pour continuer le développement d'un modèle global des ondes dans la magnétosphère (voir une présentation présentant ce projet à cette adresse: `http://www.oma.be/sevem/Meeting_DEMETERSEVEMRABEM_20060105_Benck.pdf`).

PARTIE III

Plasmasphère

Les missions CLUSTER et IMAGE ont récemment accéléré les études sur la plasmasphère. Nous allons décrire ces récents résultats dans le Chapitre 9, avant de présenter une étude statistique sur la plasmapause et sur les structures de densité à petite échelle dans le Chapitre 10. Ce dernier sera suivi d'une étude de la structure globale de la plasmasphère (Chapitre 11), avant de finir par deux analyses de structures de densité très frequemment observées par la mission CLUSTER: les structures de densité à petite échelle dans le Chapitre 12 et les panaches plasmasphériques dans le Chapitre 13.

CHAPITRE 9

Contexte Général

9.1 Avant la mission CLUSTER

La plasmasphère a été introduite dans le Paragraphe 1.4. Après sa découverte à la fin des années 60, de nombreuses études ont permis une analyse plus poussée de cette région de la magnétosphère, notamment à l'aide de satellites scientifiques, tels que OGO-5 [Chen et Grebowsky, 1974], GEOS-1 et -2 [Décréau et al., 1986], CRRES [LeDocq et al., 1994], LANL [Moldwin et al., 1995], Akebono [Oya, 1997], DE-1 [Comfort, 1996], ou ISEE-1 [Carpenter et Anderson, 1992], mais également en utilisant des mesures de sifflements faites à partir de stations au sol (voir Carpenter et al. [1993] utilisant différents jeux de données). Une revue de l'ensemble de ces observations a été faite par Lemaire et Gringauz [1998].

Récemment, les études sur la plasmasphère ont été tres nettement accélérées grâce à deux différentes missions: la mission d'imagerie globale de la NASA, IMAGE (voir le Chapitre 3 pour la description de cette mission), et la mission multi-satellites de l'ESA, CLUSTER (pour la description générale de cette mission, voir le Chapitre 2).

9.2 Résultats de la mission IMAGE

La mission IMAGE a permis notamment de visualiser pour la première fois la plasmasphère, et d'y découvrir de nombreuses structures inconnues jusqu'alors, ou seulement découvertes théoriquement. Ainsi, des observations de panaches plasmasphériques ont été faites avec l'instrument EUV (description de cet instrument dans le Chapitre 3) à bord du satellite IMAGE: voir par exemple les travaux de Spasojević et al. [2003], Garcia et al. [2003] ou Goldstein et al. [2004], qui ont confirmé par des observations globales l'existence des panaches plasmasphériques. D'autres structures plasmasphériques ont été observées et leur formation et évolution analysées: par exemple les encoches[1], qui sont caractérisées par de profondes diminutions de densité d'un facteur de 5 à 10 et qui s'étendent principalement dans la direction radiale vers l'intérieur de la plasmasphère jusqu'à L = 2, ou même moins [Gallagher et al., 2005]. Ces structures ont été utilisées comme traceur de la rotation de la plasmasphère, notamment car elles ont une longue durée de vie, jusqu'à 60 heures. Elles ont permis de montrer que le mouvement de la plasmasphère vers $L = 2 - 3$ était de 10 à 15 % inférieur à la co-rotation [Sandel et al., 2003; Burch et al., 2004]. Par ailleurs, l'érosion de la plasmasphère en cas d'augmentation de l'activite géomagnétique a été clairement observée, et parfois reliée à la composante Z du champ

[1] Anglais: notch

magnétique interplanétaire, B_Z [Goldstein et al., 2003a]. En outre, la mission IMAGE a produit de nouvelles informations sur les régions sources d'une onde électromagnétique appellée le continuum kilométrique[2]: ces ondes sont générées à la plasmapause à partir de sources se situant très près de l'équateur magnétique [Green et al., 2002] et elles sont très souvent associées à des chutes de densité ou à la présence d'encoches dans la plasmasphère [Green et al., 2004]. D'autres observations et résultats concernant la plasmasphère obtenus avec l'instrument EUV à bord du satellite IMAGE sont présentées dans la revue de Sandel et al. [2003].

9.3 Résultats de la mission CLUSTER

Bien que l'étude de la plasmasphère n'était pas un objectif prioritaire de la mission multi-satellites CLUSTER, celle-ci a permis de nombreuses études sur cette région. Des analyses de panaches plasmasphériques ont ainsi été effectuées par Darrouzet et al. [2006a]; elles seront décrites dans le Chapitre 13. Dandouras et al. [2005] ont analysé la structure ionique de la plasmasphère à l'aide de l'instrument CIS, et ont conclu que les ions H^+ et He^+ avaient les mêmes profils de densité, avec une valeur inférieure pour He^+ d'un facteur d'environ 15, alors que les ions O^+ n'ont pas été observés aux altitudes des satellites CLUSTER ($> 4R_E$). Les panaches ont également été observés avec les données de cet instrument. Les structures de densité ont été analysées par l'instrument WHISPER dans le secteur du crépuscule [Décréau et al., 2005], mais également de manière statistique [Darrouzet et al., 2004]. Cette analyse sera présentée dans le Chapitre suivant. De nombreux résultats sur les ondes observées dans la plasmasphère ont également été obtenus avec la mission CLUSTER. Ainsi, les radiations du continuum non thermique terrestre[3] ont été analysées avec différentes techniques multipoints appliquées aux données de l'instrument WHISPER [Décréau et al., 2004]: les sources de ces ondes ont été localisées près de la plasmapause et l'amplification de ces radiations a été observée en conjonction avec des chutes de densité de petite taille observées dans la plasmasphère. Récemment, la théorie de Jones [1982] sur l'angle de rayonnement de ces émissions a été confrontée avec les observations de WHISPER [Grimald et al., 2006]. Les propriétés de ce continuum non thermique observé non loin des sources ont également été déduites de cette étude. Enfin, la mission CLUSTER a permis une meilleure caractérisation des ondes ELF et VLF dans la plasmasphère: les sifflements[4] près de la plasmapause [Moullard et al., 2002], les souffles[5] près de la plasmapause [Masson et al., 2004], les choeurs[6] dans le plan magnétique équatorial [Santolík et Gurnett, 2003; Santolík et al., 2004; Parrot et al., 2004], ou encore des émissions reliées à la gyrofréquence des électrons observées près de l'équateur magnétique [El-Lemdani Mazouz et al., 2006]. Pour toutes ces études, le côté multi-satellites de la mission CLUSTER a grandement contribué à obtenir des résultats nouveaux.

[2] Anglais: kilometric continuum
[3] Anglais: non-thermal continuum radiation
[4] Anglais: whistler
[5] Anglais: hiss
[6] Anglais: chorus

CHAPITRE 10

Etude Statistique

Les satellites CLUSTER traversent la plasmasphère à l'occasion de chaque orbite au niveau de son périgée, c'est-à-dire environ tous les deux jours et demi, vers 4 R_E. Il est donc ainsi possible de faire une étude statistique de la plasmapause, mais également des structures de densité observées par l'instrument WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER. En effet, cet instrument fournit la densité électronique de manière absolue et avec une bonne résolution temporelle, permettant de résoudre des petites structures de densité rencontrées dans la plasmasphère. Cependant, il faut noter que lorsque l'activité géomagnétique est importante, la plasmasphère se contracte et peut se situer en deçà du périgée de CLUSTER, ce qui limite une telle étude statistique (voir plus bas pour plus de détails).

Nous avons analysé 33 traversées de plasmasphère, entrantes et sortantes, pour les 4 satellites, c'est-à-dire un total de 264 traversées, qui correspondent à la période de Mars 2001 à Mars 2003, avec des distances de séparation entre les quatre satellites variant de 100 à 6000 km. Il est clair que cette statistique n'est pas très importante, notamment en raison de la difficulté d'obtenir de manière automatique la densité électronique à partir des données de l'instrument WHISPER. Nous avons utilisé l'indice géomagnétique K_p pour évaluer le niveau d'activité géomagnétique (voir définition de cet indice dans l'Annexe A), comme dans la plupart des études précédentes sur la plasmasphère et sur la plasmapause. Nous avons choisi des valeurs de K_p variables suivant le temps et dépendantes de la position en temps magnétique local (MLT) du point de mesure. D'après la théorie de formation de la plasmapause basée sur le mécanisme d'instabilité d'interchange (mécanisme décrit dans le Chapitre 4), la plasmapause se forme dans le secteur MLT de l'après minuit [Lemaire, 1974, 1975, 2001]. La valeur maximale de K_p (K_{p-max}) durant les 6 heures précédentes est utilisée pour des mesures effectuées dans une région de MLT compris entre 03:00 et 09:00; K_{p-max} durant les 12 heures précédentes pour MLT entre 09:00 et 15:00; K_{p-max} durant les 18 heures précédentes pour MLT entre 15:00 et 21:00; la valeur instantanée de K_p pour MLT entre 21:00 et 03:00.

10.1 Position et épaisseur de la plasmapause

Pour chaque traversée de plasmasphère, nous avons identifié la plasmapause par le plus grand gradient de densité, avec un saut minimum de densité d'un facteur 5 sur une distance radiale d'1 R_E, ou moins. La Figure 10.1 donne la position de la plasmapause en unité de R_{equat} (voir définition de ce paramètre dans l'Annexe A) en fonction de MLT, et pour 4 intervalles différents de K_p. On observe généralement des valeurs entre 4 et 7 R_E, avec notamment un bulge dans le secteur de l'après-midi. Globalement, nos résultats sont en accord avec les tendances

des études précédentes: par exemple, la plasmapause se forme plus près de la Terre quand le niveau d'activité géomagnétique augmente. Cependant, dans le secteur de l'après-midi (17:00 − 19:00 MLT), la plasmapause se trouve plus éloignée de la Terre lorsque l'indice K_p est compris entre 2 et 3 que lorsqu'il est compris entre 1 et 2. Une explication pourrait provenir de la couverture limitée de notre jeu de données en terme de MLT et K_p. En effet, notre base de données ne contient pas d'événements dans le cas où l'indice K_p est supérieur à 6 (et très peu avec $K_p \geq 4$). La raison de ce biais provient de la brièveté de la durée de passage des satellites CLUSTER dans la plasmasphère, et de la faible probabilité d'avoir un fort niveau d'activité géomagnétique (c'est-à-dire des larges valeurs de K_p par rapport au nombre d'intervalles de temps). Par ailleurs, dans le cas d'un indice $K_p \geq 6$, la plasmapause se formera plus près de la Terre, et donc souvent plus bas que le périgée de CLUSTER, qui est de 4 R_E.

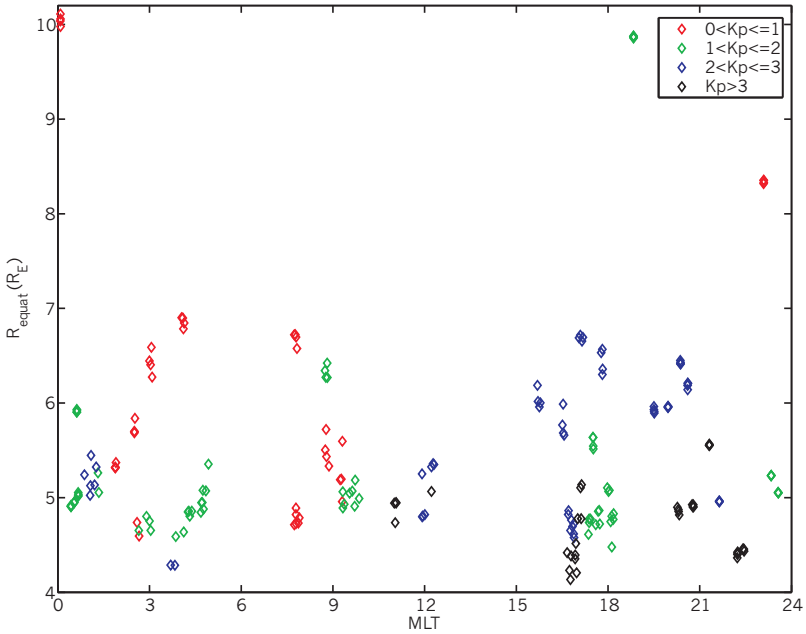

Figure 10.1: *Distance radiale équatoriale de la plasmapause en fonction de MLT et pour différents intervalles de K_p.*

L'épaisseur de la plasmapause peut-être déterminée à partir des profils de densité tracés en fonction de R_{equat} de la manière suivante: lorsque la variation de densité le long du profil devient inférieure à 5 % sur une distance de 0.02 R_E, nous considérons cette position comme étant une extrémité de la plasmapause. Les résultats de cette analyse sont indiqués sur la Figure 10.2, en fonction de MLT, et pour différents intervalles de K_p. L'épaisseur décroît lorsque l'indice K_p croît, et cela quelque soit le secteur MLT. Elle est maximale aux alentours de 09:00 MLT et du côté crépuscule. Ces résultats doivent cependant être pris avec précaution, du fait que la base de données n'est pas uniformément distribuée entre les différents secteurs de temps local (il y a moins de données du côté midi). Par ailleurs, les satellites traversent la plasmasphère dans le même secteur de temps local à la même période de chaque année en raison de la précession de l'orbite de CLUSTER; des effets saisonniers pourraient donc également affecter ces résultats.

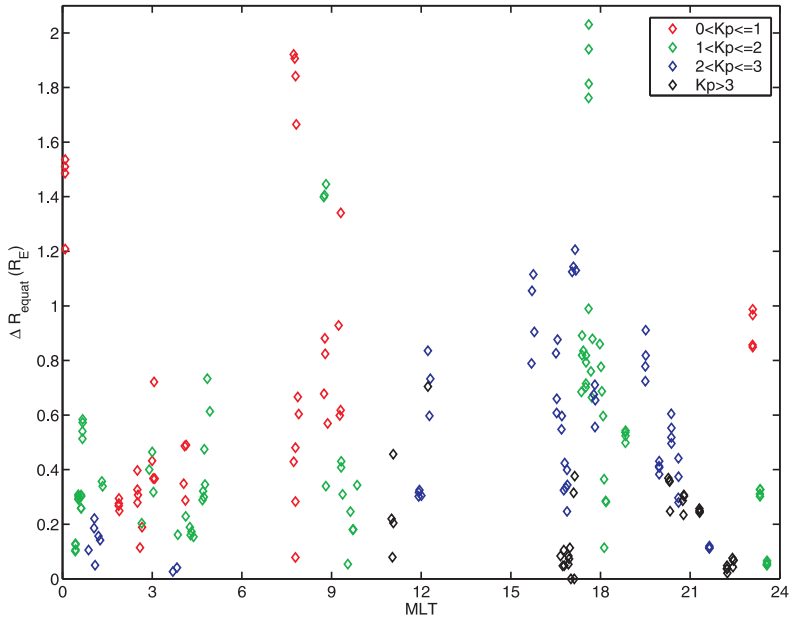

Figure 10.2: *Epaisseur de la plasmapause en fonction de MLT et pour différents intervalles de* K_p.

Nous pouvons également remarquer que ces deux études statistiques sont sujettes à caution. En effet, l'identification de la position de la plasmapause est un exercice assez délicat, en particulier dans le secteur de midi, ou après de longues périodes d'activité géomagnétique faible quand la densité décroît lentement jusqu'à des distances supérieures à 8 R_E. Une autre difficulté provient de la présence de structures de densité à petite et moyenne échelle à l'intérieur de la plasmasphère, et en particulier au niveau de la plasmapause. Leur présence (dont une statistique est présentée dans le paragraphe suivant) accroît la difficulté pour identifier clairement la plasmapause comme étant le plus grand gradient de densité, avec un saut minimum de densité d'un facteur 5 sur une distance radiale d'1 R_E, ou moins. Par ailleurs, la présence de panaches plasmasphériques, présentées dans le Chapitre 13, peut également entraîner des difficultés dans la détermination de la position de la plasmapause.

10.2 Structures de densité à petite échelle

Parallèlement à cette étude statistique de plasmapause, nous avons examiné la présence de structures de densité à petite échelle à l'intérieur de la plasmasphère. Nous les avons définies par une décroissance du rapport de densité d'au minimum 10 %. Supposant que ces structures sont plus ou moins alignées avec les lignes de champ magnétique, nous pouvons regarder leur distribution en fonction de la distance équatoriale R_{equat} (paramètre défini dans dans l'Annexe A). Le panneau (a) de la Figure 10.3 donne la distribution de ces structures de densité en fonction de leur taille transversale équatoriale ΔR_{equat}, avec une courbe fittant cette distribution (en rouge). Les panneaux (b) et (c) montrent, respectivement, les distributions en MLT et K_p de ces

structures, pondérées par la probabilité d'existence de ces paramètres. Le panneau (d) fournit le rapport de densité, avec une courbe fittant ce rapport (en rouge).

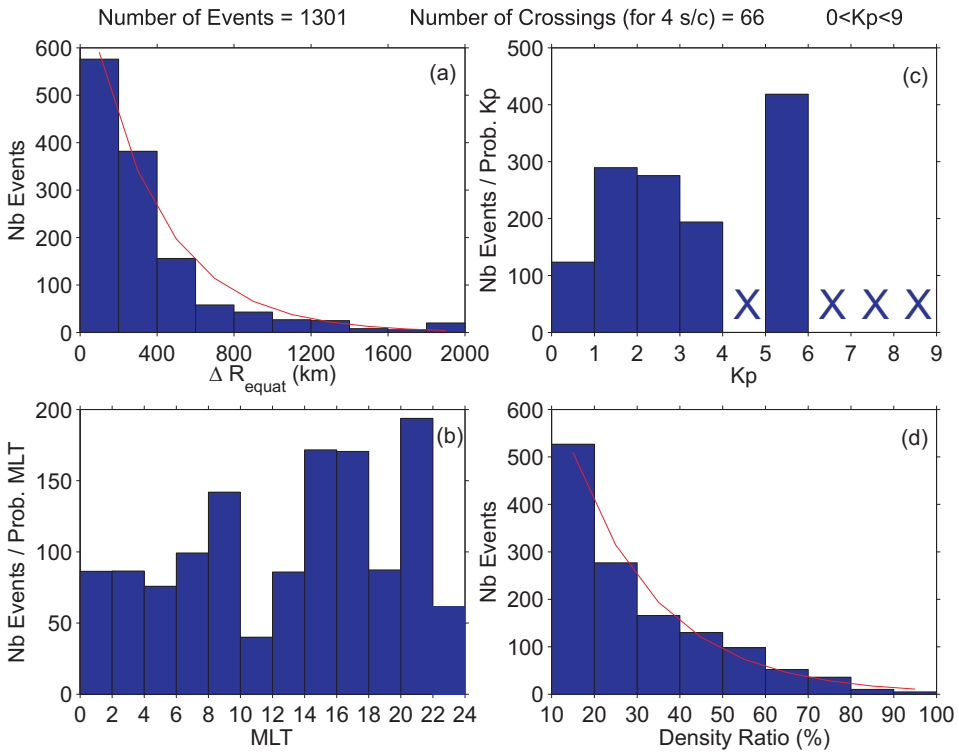

Figure 10.3: *Statistiques sur les structures de densité à petite échelle observées par CLUSTER pour tous les indices K_p disponibles dans notre étude.*

Cette étude montre que, sur l'orbite de CLUSTER, il y a plus de structures de densité à petite échelle dans les secteurs de temps local de l'aurore, de l'après-midi et de l'après-crépuscule. Il est intéressant de noter que deux de ces secteurs correspondent aux secteurs où la plasmapause a tendance à devenir plus large. Ces structures se trouvent rarement dans les secteurs de l'avant-midi et de la nuit. La distribution de leur taille transversale équatoriale et de leur rapport de densité suivent une variation exponentielle (suivant les courbes dessinées en rouge dans les panneaux (a) et (d) de la Figure 10.3). La taille caractéristique est de 365 km et le rapport de densité caractéristique de l'ordre de 20 %.

Afin d'étudier la distribution de ces structures de densité à petite échelle en fonction de l'activité géomagnétique, nous avons redessiné ces statistiques pour deux intervalles de K_p différents: lorsque $K_p \leq 2^+$ (Figure 10.4), et lorsque $K_p > 2^+$ (Figure 10.5). Nous avons choisi cette valeur de 2^+ pour avoir suffisamment de données dans les deux cas. Les structures de densité ayant la plus grande taille transversale sont observées pour des indices K_p faibles ($K_p \leq 2^+$), du fait notamment que les plus larges ne peuvent être rencontrées sur l'orbite de CLUSTER dans le cas de forte activité géomagnétique, car dans ce cas, la plasmasphère devient petite. Dans le cas d'un K_p inférieur ou égal à 2^+, les structures de densité se situent principalement dans le secteur du crépuscule, tout comme lorsque K_p est supérieur à 2^+. Dans ces

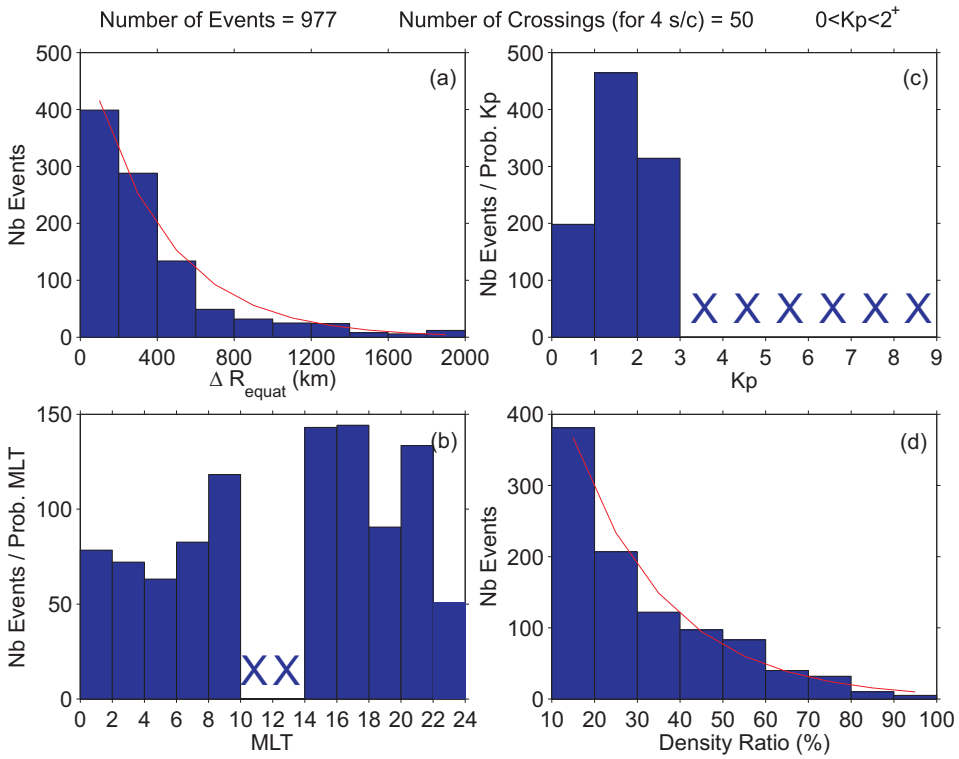

Figure 10.4: *Statistiques sur les structures de densité à petite échelle dans le cas où* $K_p \leq 2^+$.

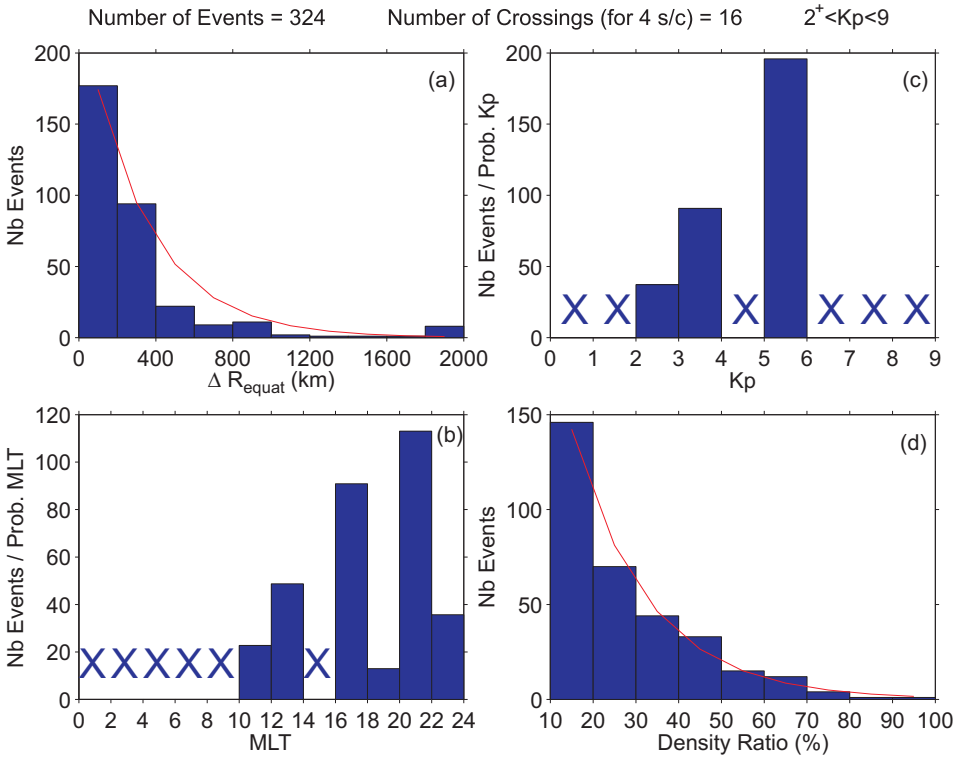

Figure 10.5: *Statistiques sur les structures de densité à petite échelle dans le cas où* $K_p > 2^+$.

deux cas, la taille caractéristique, obtenue en fittant la distribution (courbe rouge), est d'environ 370 km et le rapport de densité caractéristique de l'ordre de 20 %. Comme attendu, il y a plus de structures de densité à petite échelle durant et après les périodes de forte activité géomagnétique, suggérant qu'elles sont générées près du secteur du crépuscule par les variations du champ électrique magnétosphérique de convection. Cependant, comme mentionné précédemment, notre échantillon ne possède que quelques cas avec un indice K_p élevé, ce qui créé un biais dans sa distribution.

Les structures de densité à petite échelle sont prédites par des modèles plasmasphériques qui simulent les processus de convection et de remplissage de la plasmasphère, tels que le modèle CDPDM (Convection Driven Plasmasphere Dynamic Model) [Galperin et al., 1997] ou le modèle self-consistant RCM (Rice Convection Model) [Spiro et al., 1981]. Le remplissage de la plasmasphère peut également produire ces structures de densité à petite échelle dans les régions équatoriales [Singh, 1988; Singh et Horwitz, 1992]. Des changements d'orientation du champ magnétique interplanétaire (IMF) influencent aussi la convection, et pourraient être responsables de la formation de ces structures de densité [Goldstein et al., 2002; Spasojević et al., 2003]. L'orientation de l'IMF pourrait ainsi être un paramètre utilisé dans l'étude des structures de densité à petite échelle. Le mécanisme d'interchange peut également créer de telles structures [Lemaire, 2001].

10.3 Conclusions

Cette étude statistique nous a montré que l'on observe ces structures de densité à petite échelle dans presque tous les secteurs MLT, et cela même pour des indices K_p relativement faibles. Leur taille caractéristique est d'environ 370 km et le rapport de densité caractéristique de l'ordre de 20 %. Il est clair que l'échantillon utilisé dans cette étude statistique n'est pas très important, mais les résultats obtenus, conformes aux études précédentes en ce qui concerne la plasmapause et nouveaux en ce qui concerne les structures de densité, nous encouragent à poursuivre cette analyse avec un jeu de données plus important.

CHAPITRE 11

Structure Globale de la Plasmasphère

11.1 Introduction

La mission CLUSTER permet d'étudier la géométrie de la plasmasphère, et notamment l'orientation de la distribution globale de la densité par rapport au champ magnétique, à l'aide de mesures simultanées à haute résolution en quatre points distincts et proches. Pour cela, nous utilisons un outil d'analyse à quatre points présenté dans le Chapitre 6: le gradient spatial d'une quantité scalaire. Nous l'appliquons à la densité électronique et à la magnitude du champ magnétique, puis comparons leurs directions respectives avec le champ magnétique local [Darrouzet et al., 2006b]. En dehors de l'évaluation des dérivées des composantes du champ magnétique pour déterminer le rotationnel et la divergence de $\boldsymbol{B}$, dans le but de déduire des directions normales ou des densités de courant électrique [Vallat et al., 2005; Dunlop et al., 2006], aucun gradient scalaire n'a été systématiquement calculé dans la plasmasphère, principalement en raison de problèmes de calibration. Ce travail, traitant en profondeur une traversée complète de la plasmasphère, est une première étape pour améliorer cette situation. Nous discutons ici surtout du rôle des composantes du gradient le long et à travers des tubes de flux. Ainsi, les gradients de densité transversaux nous indiquent la présence de variations azimutales de densités. Par ailleurs, il existe des modèles empiriques de la distribution de densité dans la plasmasphère [Carpenter et Anderson, 1992; Gallagher et al., 2000; Sheeley et al., 2001; Denton et al., 2004; Huang et al., 2004]. Cette étude est une première étape afin de comparer de tels modèles avec des observations traitées en multipoints.

11.2 Description des données

Cette traversée de plasmasphère typique se situe le 7 Août 2003, entre 07:00 et 09:00 UT, à 14:00 LT et à des latitudes magnétiques entre -30° et $+30^\circ$ [Darrouzet et al., 2006b]. La valeur maximale de l'indice K_p durant les 24 heures précédentes était de 2^+, impliquant un régime d'activité géomagnétique calme. La distance de séparation entre les quatre satellites est petite ($200\times400\times1000$ km dans les directions X, Y, Z du système de coordonnées GSE) et les paramètres géométriques du tétraèdre sont satisfaisants: élongation de 0.85 et planéité entre 0.5 and 0.8 (voir le Paragraphe 6.2 et Robert et al. [1998] pour des explications détaillées au sujet de ces quantités). La Figure 11.1 représente par une ligne noire pleine l'orbite du satellite C3

durant la traversée, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. Des modèles de la position de la magnétopause et du choc d'étrave, ainsi que des lignes de champ magnétique sont indiqués pour référence.

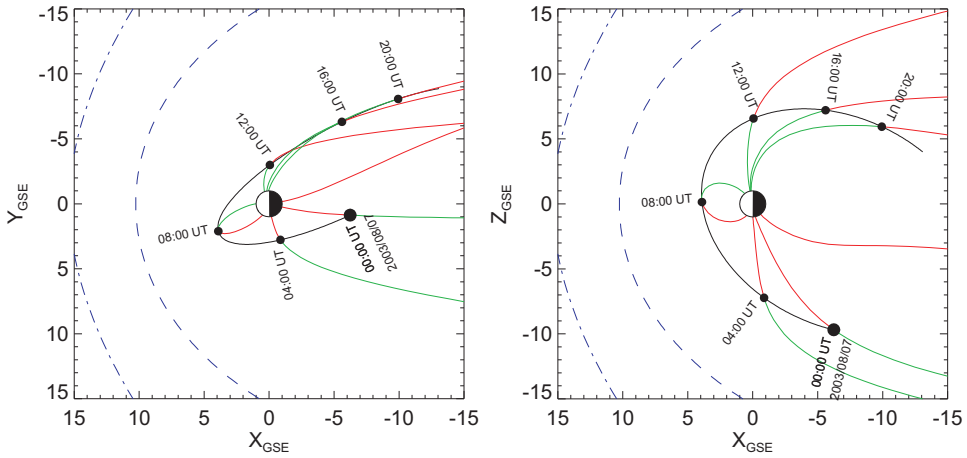

Figure 11.1: *Projection de l'orbite du satellite C3 dans les plans XY et XZ GSE durant la traversée du 7 Août 2003, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. La ligne bleue en pointillé indique la position de la magnétopause, alors que le choc d'étrave est tracé en bleu point-pointillé. Une ligne de champ magnétique a été tracée toutes les 4 heures vers la magnétopause ou vers la Terre: les lignes parallèles au champ magnétique (direction Sud-Nord) sont tracées en vert, alors que les lignes anti-parallèles (direction Nord-Sud) le sont en rouge (D'après le groupe de travail CLUSTER-SOL,* `http://ion.le.ac.uk/~cluster/orbit_plots.html`*).*

Dans cette étude, nous utilisons la densité déterminée par WHISPER, car comme cela a été expliqué dans le Chapitre 2, cette quantité est déterminée de manière absolue par les quatre instruments (contrairement aux autres expériences particules à bord de CLUSTER, soit non disponibles sur les quatre satellites, soit ayant des difficultés d'inter-calibration). Et, de fait, l'étude de la distribution et de l'orientation de la structure globale de la densité dans la plasmasphère est essentielle pour la compréhension de cette région, et notamment par rapport aux modèles de densité déjà existants et par rapport au mécanisme de remplissage de cette région.

L'autre quantité physique utilisée dans cette étude de gradient est la magnitude du champ magnétique mesurée par les quatres instruments FGM, car ce sont des données également très fiables et avec une très grande résolution temporelle. Cette quantité est utile dans la mesure où elle est reliée au rayon de giration et à la gyrofréquence des particules, qui sont des paramètres importants dans l'étude de la plasmasphère. De plus, l'analyse de ce gradient indique clairement la position de l'équateur magnétique, et étant une quantité variant de manière relativement régulière dans la plasmasphère, cela permet une sorte de test de l'outil gradient spatial sur une grande échelle de temps.

La Figure 11.2 représente des spectrogrammes temps-fréquence déterminés par les quatre instruments WHISPER en mode naturel et actif durant la traversée complète de la plasmasphère. L'équateur magnétique est rencontré par les quatre satellites presque en même temps, vers 08:10

UT, comme indiqué par la présence d'intenses ondes électrostatiques. La gyrofréquence des électrons F_{ce}, ainsi que ses harmoniques, sont clairement visibles durant la traversée, ainsi que les variations de la fréquence hybride haute, F_{uh}, qui augmente de 20 à 60 $-$ 70 kHz durant la partie entrante de la traversée jusqu'à l'équateur magnétique, puis décroît jusqu'à 20 kHz dans la traversée sortante. Cette quantité, associée à F_{ce}, permet de déduire la fréquence plasma électronique, F_{pe}, à partir de la relation 2.1. On en déduit enfin la densité électronique N grâce à l'équation 2.2 (voir le Chapitre 2 pour ces deux équations).

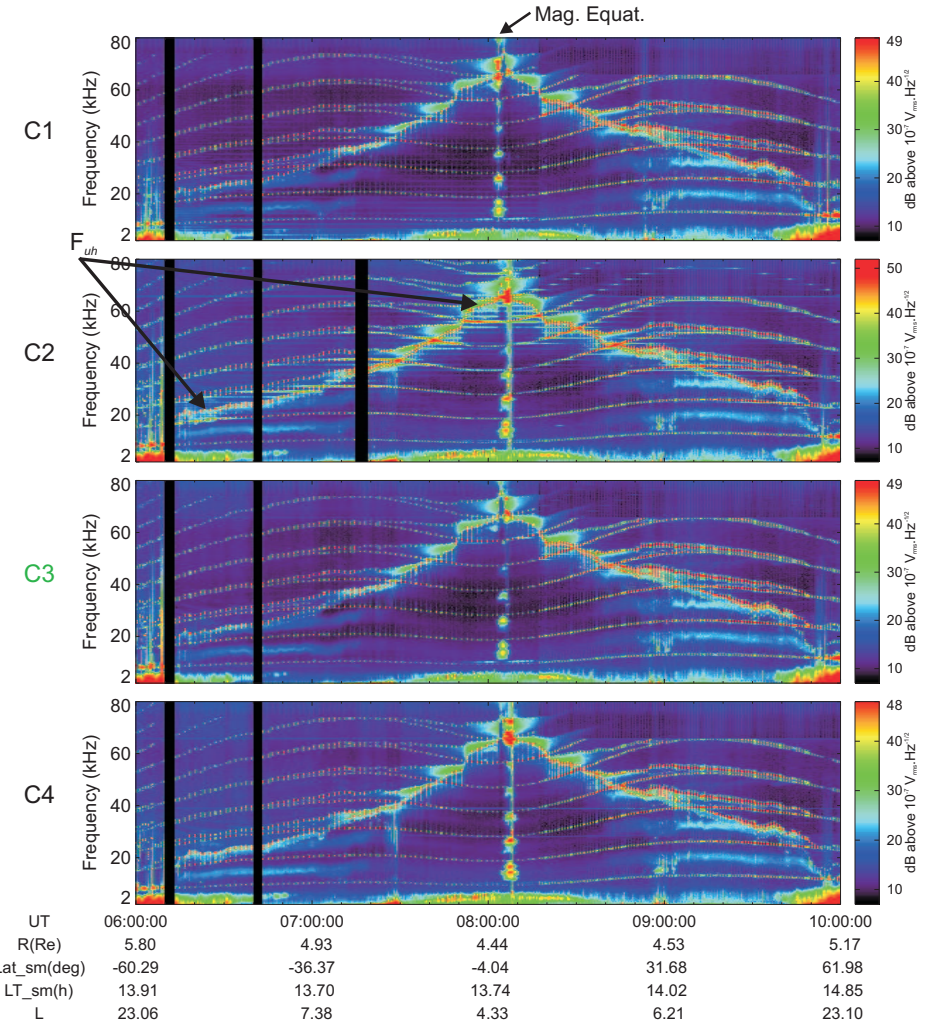

Figure 11.2: *Spectrogrammes temps-fréquence du 7 Août 2003 entre 06:00 et 10:00 UT déterminés par l'instrument WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER. Toute la traversée de la plasmasphère est montrée ainsi que l'équateur magnétique (Mag. Equat.). Les paramètres d'orbite sont ceux de C3.*

Pour vérifier et interpréter les résultats, nous avons créé un modèle de champ magnétique en évaluant, le long de la trajectoire des quatre satellites, un modèle combinant le modèle de champ magnétique interne IGRF2000 et le modèle de champ magnétique externe Tsyganenko-96 [Tsy-

ganenko et Stern, 1996]. Pour cela, nous avons utilisé la librairie UNILIB (Librairie de routines pour des applications magnétosphériques; `http://www.oma.be/NEEDLE/unilib.php/20x/`).

11.3 Analyse globale de la plasmasphère

11.3.1 Gradient spatial

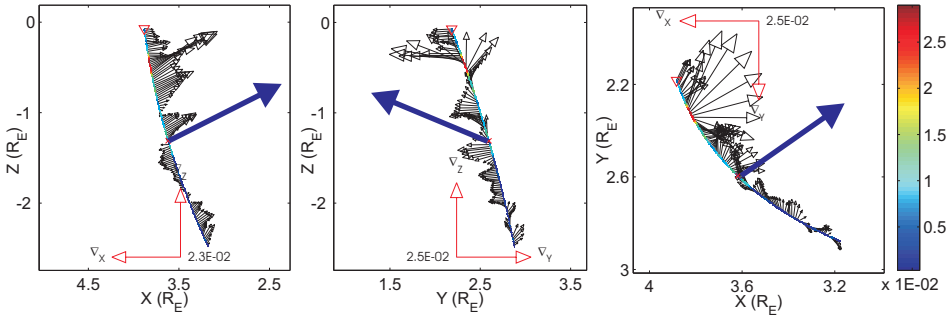

Figure 11.3: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée entrante de la plasmasphère entre 07:00 et 08:00 UT le 7 Août 2003. Les flèches bleues indiquent la direction de la Terre.*

Le gradient de densité ∇N durant la partie entrante de cette traversée de plasmasphère, indiqué sur la Figure 11.3, est dirigé globalement vers la Terre, avec quelques déviations azimutales (visibles dans le plan XY). Durant la traversée sortante, le gradient de densité est moins régulier. Les profils de densité correspondants sont dessinés sur la Figure 11.7a. Le gradient de la magnitude du champ magnétique est très régulier et dirigé vers la Terre (Figure 11.4). En estimant l'erreur d'approximation sur le gradient (liée à la condition d'homogénéité), ainsi que l'erreur due aux incertitudes sur les mesures et celle due à la forme du tétraèdre, nous pouvons déterminer l'erreur totale sur le gradient. Ce calcul d'erreur a été présenté dans le Chapitre 6. Bien qu'il soit impossible de quantifier exactement cette erreur d'approximation, nous pouvons estimer qu'elle est < 10 % dans la direction transversale (la distance de séparation entre les satellites est environ la moitié de la taille caractéristique transversale de la structure de densité), et < 5 % le long des lignes de champ (distance de séparation beaucoup plus petite que la taille de la structure le long des lignes). L'incertitude sur les mesures de fréquence est de 163 Hz et la différence typique de fréquence plasma entre les satellites est ici de l'ordre de 2 kHz, ce qui nous donne une précision relative sur la détermination du gradient de densité de l'ordre de 5 %. Ajouté aux $5 - 10$ % dûs à l'erreur d'approximation sur le gradient, et faisant abstraction de l'anisotropie des erreurs, une valeur supérieure de l'erreur totale sur le gradient de densité ∇N est de l'ordre de $10 - 15$ %.

Concernant le champ magnétique, la taille caractéristique de la structure est nettement supérieure à la distance de séparation entre les satellites, ce qui nous donne une valeur de l'erreur

d'approximation de quelques %. L'incertitude sur les mesures magnétiques est d'environ 0.1 nT, et la variation typique de magnitude de l'ordre de 5 nT. Cela nous donne une précision relative d'environ 2 %, et donc une valeur supérieure de l'erreur totale sur le gradient $\boldsymbol{\nabla} B$ d'environ 5%.

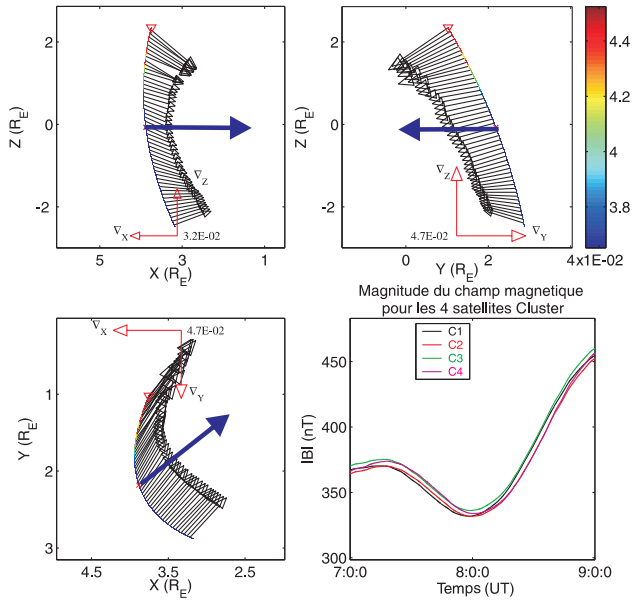

Figure 11.4: *Gradient de la magnitude du champ magnétique (dessinée en bas à droite en fonction du temps), projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée de la plasmasphère entre 07:00 et 09:00 UT le 7 Août 2003. Les flèches bleues indiquent la direction de la Terre.*

11.3.2 Définitions de différents angles

Afin d'étudier de manière plus précise cette traversée de plasmasphère, nous avons définis plusieurs angles liés au gradient spatial de la densité et à celui de la magnitude du champ magnétique.

Tout d'abord, définissons les angles entre les deux gradients $\boldsymbol{\nabla} N$ et $\boldsymbol{\nabla} B$ et le champ magnétique local $\boldsymbol{B}$ (au centre de masse des quatre satellites), angles que nous intitulons respectivement α_{BN} et α_{BB} (voir Figure 11.5). Ces deux angles varient entre 0° et 90°, car nous nous intéressons ici seulement à la direction des gradients, et non pas à leur sens. D'après nos précédents calculs sur l'erreur faite sur les gradients, et en faisant abstraction de l'anisotropie des erreurs, l'orientation des deux gradients est connue jusqu'à une précision $\leq 9°$ pour $\boldsymbol{\nabla} N$ et $\leq 3°$ pour $\boldsymbol{\nabla} B$. C'est en particulier le cas pour les angles α_{BN} et α_{BB}.

L'orientation globale du gradient de densité est également décrite par sa latitude $\theta_{\nabla N}$ (voir Figure 11.6a), ainsi que par son azimut relatif à l'azimut du centre de masse des quatre satellites, où encore l'écart du gradient par rapport au plan méridien du satellite, $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc}$ (voir Figure 11.6b), représentés dans le système de coordonnées Géographique (GEO) (voir Annexe A) sur

la Figure 11.7c-d (rouge). La latitude $\theta_{\nabla B}$ et l'azimut $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc}$ du gradient de la magnitude du champ magnétique mesuré par FGM (bleu, courbes pleines), et de celle du champ magnétique modélisé avec IGRF2000 et Tsyganenko-96 (bleu, courbes en pointillées) sont dessinées sur les mêmes panneaux de cette même Figure 11.7. La précision est $\leq 9°$ pour $\theta_{\nabla N}$ et $\phi_{\nabla N}$-ϕ_{sc}, et $\leq 3°$ pour $\theta_{\nabla B}$ et $\phi_{\nabla B}$-ϕ_{sc}.

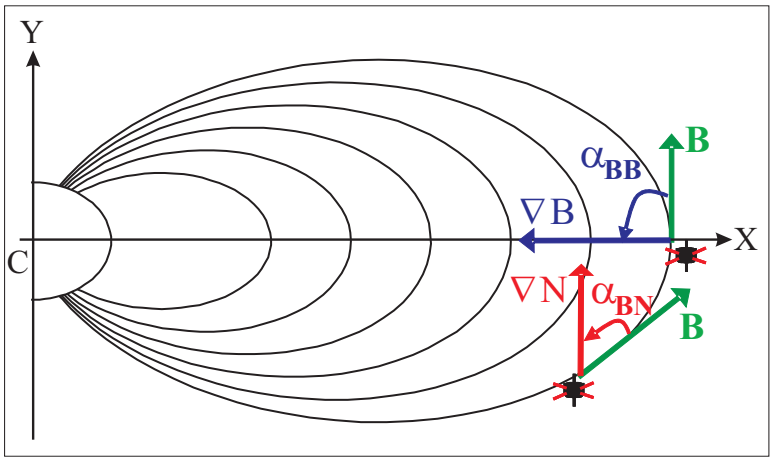

Figure 11.5: *Croquis expliquant les angles α_{BB} et α_{BN}, qui décrivent l'orientation des gradients spatiaux.*

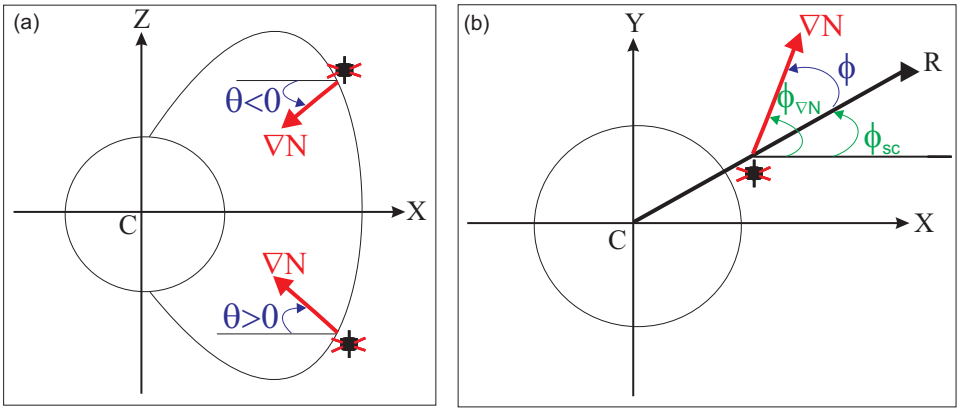

Figure 11.6: *Croquis expliquant les angles (a) θ et (b) ϕ, qui décrivent l'orientation des gradients spatiaux.*

11.3.3 Résultats

Tout d'abord, nous pouvons définir 5 régions distinctes dans cette traversée de plasmasphère, à partir des profils de densité en fonction du temps, représentés dans le panneau (a) de la Figure 11.7. En effet, les différences de densité entre les quatre satellites varient au cours

du temps, et nous permettent de définir les régions suivantes: les régions 1, 3 et 5 avec de petites différences entre les satellites, et les régions 2 et 4 avec des différences de densité plus importantes.

L'équateur magnétique, defini comme la surface où la magnitude du champ magnétique est minimum le long des lignes de champ, est croisé lorsque $\boldsymbol{B}$ et $\boldsymbol{\nabla} B$ sont perpendiculaires, i.e., α_{BB} = 90° (voir courbe bleue sur la Figure 11.7b). Cela nous permet de déterminer sans ambiguité, sur la Figure 11.7b, l'instant de croisement de l'équateur magnétique à 08:03 UT. Notons que cela ne coïncide pas forcément avec le périgée, ni avec le maximum de densité, mais il n'y a pas beaucoup de différence dans ce cas.

Avant et après avoir traversé l'équateur magnétique, les satellites échantillonnent des parties de lignes de champ plus éloignées de l'équateur; comme *B* augmente d'une manière progressive le long des lignes de champ dans la direction des pôles, α_{BB} décroît. Lorsque les satellites sont encore plus loin de l'équateur magnétique, α_{BB} devient quelque peu plus variable. Les satellites sont alors dans les parties extérieures de la plasmasphère, où la magnitude du champ magnétique est plus petite, et où des effets diamagnétiques proportionnellement plus marqués peuvent avoir une certaine influence sur le champ magnétique mesuré.

Pour le champ magnétique mesuré (données FGM) et pour le modèle de champ (IGRF-Tsyganenko), $\theta_{\nabla B}$ est très similaire, variant entre 0° et $-20°$. Pour un dipôle géomagnétique incliné (inclinaison de 10.3° à 71.7° de longitude Ouest en 2003), à 08:03 UT et 14:00 LT, l'équateur magnétique devrait être à $\theta \approx 10°$; pour le champ magnétique effectivement observé, les satellites rencontrent l'équateur magnétique à θ_{sc} = 8.5° (position des satellites à 08:03 UT), ce qui est en bon accord. A l'équateur magnétique dipolaire, $\boldsymbol{\nabla} B$ devrait être dirigé vers la Terre, ce qui devrait nous donner $\theta_{\nabla B} = -\theta_{sc}$; à l'équateur magnétique effectif, la valeur observée est $\theta^{eq}_{\nabla B}$ = $-6°$, à nouveau cohérent avec un dipôle ayant une légère déformation Nord-Sud.

La variation de $\theta_{\nabla B}$ lorsque l'on croise les lignes de champ à plus haute latitude dépend de la rapidité de croissance de B à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur magnétique. Si l'on remarque que les satellites restent durant l'ensemble de la traversée à peu près dans le même secteur LT, la Figure 11.7b indique que α_{BB} décroît rapidement, de telle manière que $\theta_{\nabla B} > \theta^{eq}_{\nabla B}$ juste au-dessus de l'équateur magnétique, et $\theta_{\nabla B} < \theta^{eq}_{\nabla B}$ juste en-dessous. Mais étant donné que les lignes de champ magnétique courbent vers la Terre lorsque l'on s'éloigne de l'équateur, nous arrivons par la suite à $\theta_{\nabla B} \ll \theta^{eq}_{\nabla B}$ à plus hautes latitudes au-dessus de l'équateur magnétique et $\theta_{\nabla B} \gg \theta^{eq}_{\nabla B}$ en-dessous de celui-ci. Le comportement de $\theta_{\nabla B}$ est déterminé par la géométrie des lignes de champ magnétique, et par la balance entre les variations de B le long des lignes de champ ($\nabla_{\parallel} B$) et par ses variations à travers les lignes de champ ($\nabla_{\perp} B$), compensé par l'inclinaison du dipôle.

Le gradient du champ magnétique mesuré (données FGM) est caractérisé par $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc}$ $\approx 200°$, alors qu'il est de l'ordre de 180° pour le gradient du modèle de champ magnétique (IGRF-Tsyganenko). Si le champ magnétique était un dipôle incliné, nous nous attendrions à $\phi_{\nabla B}$-ϕ_{sc} = 180° à l'équateur magnetique. Le modèle IGRF-Tsyganenko représente un dipôle incliné modifié et est en effet caractérisé par $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc}$ proche de 180°. L'azimut de 200° observé ici ne peut être expliqué que par une déviation du champ magnétique par rapport à la symétrie cylindrique autour de l'axe du dipôle.

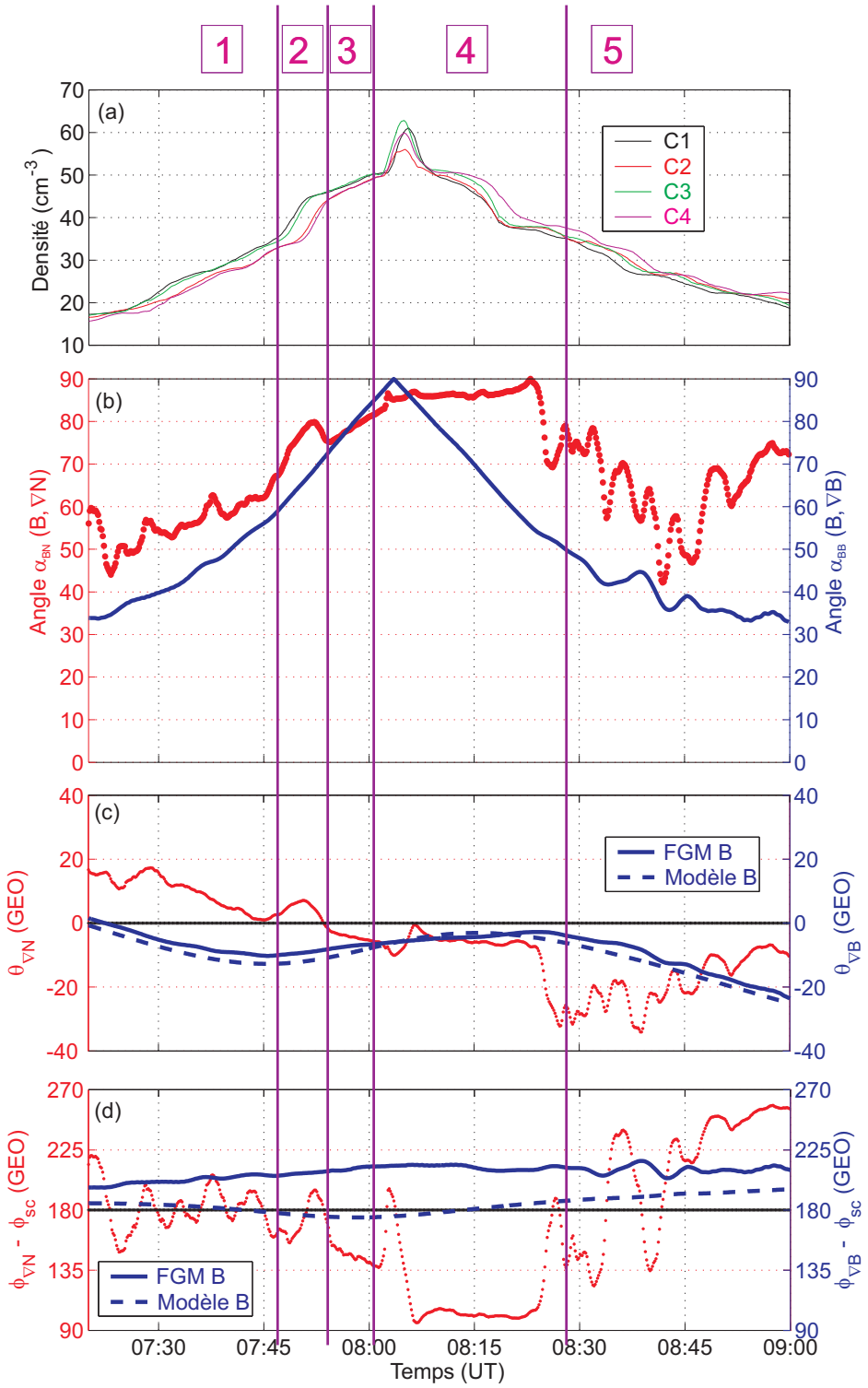

Figure 11.7: *Divers paramètres en fonction du temps durant la traversée de la plasmasphère du 7 Août 2003: (a) Densité électronique déterminée par WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER, (b) α_{BB} (courbe bleue) et α_{BN} (courbe rouge), (c) latitude θ_∇ et (d) azimut $\phi_\nabla - \phi_{sc}$ du gradient de densité (rouge) et du gradient de la magnitude du champ magnétique (bleu), en fonction du temps durant la traversée de la plasmasphère du 7 Août 2003. Les angles liés au gradient de densité $\boldsymbol{\nabla} N$ sont connus avec une précision $\leq 9°$, et les angles liés au gradient de la magnitude du champ magnétique $\boldsymbol{\nabla} B$ avec une précision $\leq 3°$.*

Aux instants où la densité varie lentement, i.e. quand les satellites voient des densités similaires à un instant donné (regions 1, 3 et 5, Figure 11.7a), α_{BN} (représenté par la courbe rouge sur la Figure 11.7b) dépend seulement de la balance entre les variations de densité le long des lignes de champ ($\nabla_{\parallel} N$) et à travers celles-ci ($\nabla_{\perp} N$), semblable au comportement de α_{BB}. α_{BN} augmente progressivement à mesure que les satellites s'approchent de l'équateur magnétique, en raison de l'absence de gradients $\nabla_{\perp} N$ abruptes. Cependant, la courbe de α_{BN} est au-dessus de celle de α_{BB} car $\nabla_{\parallel} N / \nabla_{\perp} N \ll \nabla_{\parallel} B / \nabla_{\perp} B$. Pour la même raison, $\theta_{\nabla N}$ varie de valeurs positives dans l'hémisphère Sud vers des valeurs négatives dans l'hémisphère Nord, avec une grande région centrale où $\theta_{\nabla N} \approx 0°$ (Figure 11.7c). Dans ces mêmes régions de petite variation de densité, $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc}$ fluctue autour de 180° (Figure 11.7d).

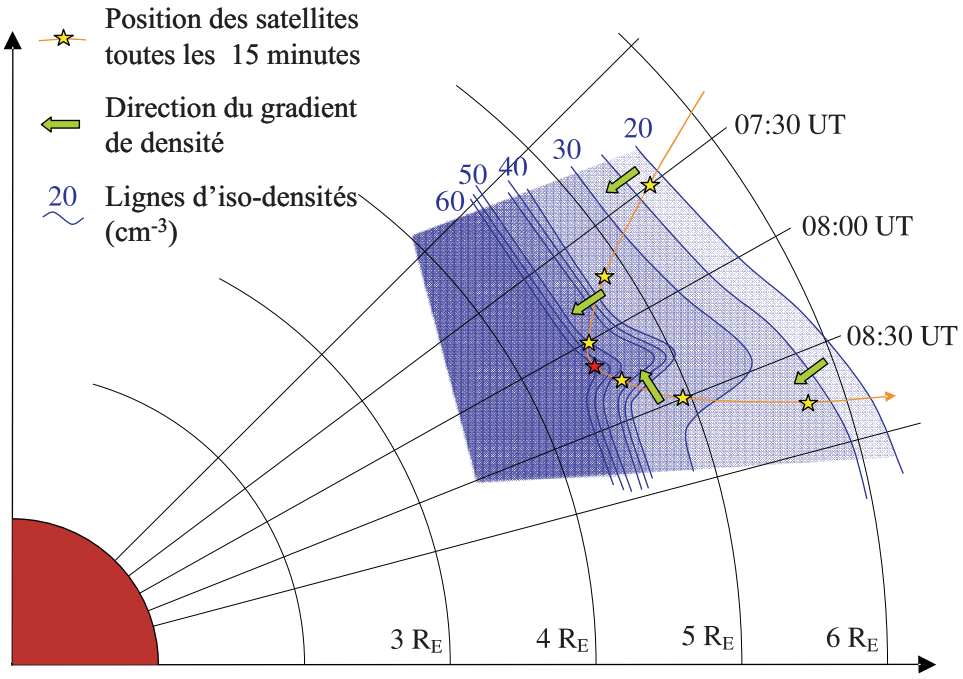

Figure 11.8: *Croquis de la traversée de la plasmasphère projetée dans le plan équatorial dans un repère en co-rotation centré sur 08:00 UT et 14:00 LT, le 7 Août 2003. La trajectoire du centre de masse des quatres satellites CLUSTER est tracée en jaune, avec la position du centre de masse toutes les 4 heures. Les directions du gradient de densité sont en vert et les contours de densité en bleu, de 20 à 60 cm^{-3}. Le gradient de densité est dirigé vers l'intérieur durant la traversée entrante, puis azimutalement vers le crépuscule durant la majeure partie de la traversée sortante.*

Quand les satellites observent différentes valeurs de densité à un instant donné (régions 2 et 4), les gradients de densité sont assurément plus forts (Figure 11.7a). α_{BN} atteint de grandes valeurs durant ces intervalles de temps, et en particulier proche de 90° lorsque $\nabla_{\perp} N$ est important (Figure 11.7b). Comme $\theta_{\nabla N} \approx 0°$ (Figure 11.7c), ces gradients correspondent à des structures transversales de densité, comme remarqué précédemment sur les projections du gradient de densité dans la Figure 11.3. Puisqu'à ces positions nous avons $\nabla_{\perp} N \gg \nabla_{\parallel} N$, cela

explique pourquoi α_{BN} est beaucoup plus proche de 90° ici.

Durant l'augmentation rapide de densité entre 07:50 et 07:55 UT (région 2), $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc}$ est proche de 180° (Figure 11.7d), ce qui montre que les satellites traversent perpendiculairement cette structure de densité. Cela se remarque également sur la Figure 11.7a qui montre un passage séquentiel des quatre satellites à travers la structure. Cependant, durant la plupart de la traversée sortante de la plasmasphère (région 4, entre 08:00 et 08:25 UT), $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc} \approx 90°$, indiquant une traversée parallèle de cette structure de densité, visible également dans la Figure 11.7a avec les satellites restant à des positions différentes de l'interface durant de longues périodes. Ceci est dessiné dans le plan équatorial sur la Figure 11.8, avec les satellites traversant la plasmasphère, ainsi que cette structure de densité. Nous pouvons vérifier que pour cette structure, la condition d'homogénéité est satisfaite, et que les gradients de densité nous permettent d'obtenir l'orientation de cette structure, ce qu'il n'aurait pas été possible de déterminer avec un seul satellite.

11.4 Conclusions

Pour conclure, cette étude nous a permis de faire la première analyse systématique du gradient spatial dans la plasmasphère à l'aide de données de la mission CLUSTER. Nous avons ainsi présenté une vue plus complète de la géométrie de la plasmasphère, et évalué l'importance relative entre les deux effets influençant les gradients spatiaux à l'intérieur de la plasmasphère: l'augmentation de la densité et de la magnitude du champ magnétique le long des lignes de champ en s'éloignant de l'équateur, et la diminution de ces deux quantités à mesure qu'on s'éloigne de la Terre. Cette analyse nous a également permis d'observer des déviations non négligeables par rapport à la symétrie cylindrique.

Nous devons également noter les limites d'application de cette étude qui utilise l'outil gradient. Tout d'abord, les calculs de gradient ne sont justifiés que lorsque la condition d'homogénéité est satisfaite. Par ailleurs, la limite supérieure de l'instrument WHISPER (80 kHz) permet des mesures de densité jusqu'à 80 cm^{-3}, et lorsque les satellites CLUSTER rentrent profondément dans la plasmasphère (tout en étant limité par le périgée relativement haut), des panaches à plus forte densité pourraient être rencontrés. Dans ce cas, il serait possible d'utiliser le potentiel du satellite pour déterminer ces hautes densités, mais la calibration de telles données est très délicate, ce qui rendrait le calcul du gradient difficile.

CHAPITRE 12

Structure de Densité à Petite Echelle

Après avoir étudié la distribution statistique des structures de densité à petite échelle et la structure globale de la plasmasphère, il est intéressant d'en analyser une avec précision, en utilisant la possibilité des quatre satellites de la mission CLUSTER.

12.1 11 Avril 2002

La structure de densité à petite échelle qui nous intéresse ici se situe à l'intérieur d'une plasmasphère très perturbée, comme l'indique la Figure 12.1, où sont représentés les profils de densité des quatre satellites CLUSTER en fonction du temps. Cet événement se déroule le 11 Avril 2002, vers 21:00 MLT, avec une distance de séparation entre les satellites d'environs 150 km. Durant cette traversée, le tétraèdre est relativement alongé, avec une élongation de l'ordre de 0.8 et une planéité inférieure à 0.2. Malgré cette configuration non optimale, il est possible d'obtenir un gradient spatial utilisable. On peut très clairement observer deux traversées de panache sur les bords de la plasmasphère (ils seront étudiés en détails dans le Chapitre 13), ainsi qu'un grand nombre de structures de densité à petite échelle à l'intérieur de la plasmasphère.

Nous allons nous concentrer sur la structure vers 05:30 UT, indiquée par la lettre Z sur la Figure 12.1. Son profil de densité est dessiné de manière plus précise en bas à droite de la Figure 12.2. On peut voir que les quatre satellites se trouvent en même temps dans cette structure, ce qui permet d'appliquer l'outil gradient spatial durant tout l'intervalle. La corrélation temporelle étant satisfaite pour les deux frontières de cette structure, il est également possible de déterminer les vitesses normales de celles-ci. Les projections du gradient et de la vitesse normale de la frontière entrante sont dessinées sur la Figure 12.2. La direction du champ magnétique $\boldsymbol{B}$ a également été ajoutée sur cette figure. On peut voir que la trajectoire des satellites est pratiquement parallèle au champ magnétique, ce qui est logique vu qu'on est presqu'à l'équateur magnétique à cet instant. Le gradient spatial de densité est principalement parallèle au plan XY en GSE, et globalement perpendiculaire au champ magnétique. Ce gradient se trouve donc dans le plan équatorial, ce qui est attendu pour une structure proche de l'équateur.

La vitesse normale de la frontière entrante de la structure, vers 05:32 UT, déterminée par la méthode des délais, est V_N = 1.9 km/s. Ses projections dans les plans GSE, indiquées par des flèches oranges sur la Figure 12.2, montrent une forte composante dans la direction X. On observe une bonne correspondance entre les résultats du gradient et ceux de la vitesse normale.

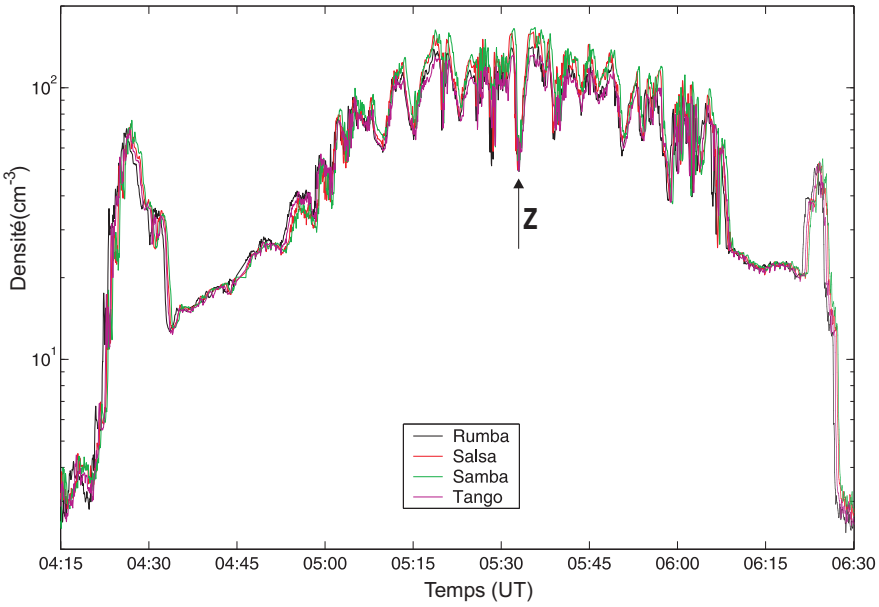

Figure 12.1: *Profils de densité déterminés par les quatre instruments WHISPER le 11 Avril 2002 entre 04:15 et 06:30 UT.*

Cette structure de densité étant observée bien à l'intérieur de la plasmasphère, autour de 4.5 R_E de distance radiale, l'hypothèse de mouvement azimutal est justifié. Il est ainsi possible de déduire de cette vitesse normale de frontière une vitesse azimutale de plasma en utilisant la méthode décrite dans l'Annexe D. Avec un angle de 55 ° entre la direction normale et la direction radiale, nous obtenons ainsi une vitesse azimutale de plasma V_P = 2.3 $\pm$ 0.2 km/s. Un résultat équivalent est obtenu pour la frontière sortante: V_P = 2.2 $\pm$ 0.2 km/s. Ces vitesses de plasma sont très proches de la vitesse de co-rotation à cette distance, V_C = 2.1 km/s (déterminée à l'aide de l'équation donnée dans l'Annexe D). Cela confirme que cette structure de densité est en co-rotation autour de la Terre, avec une magnitude proche de celle de la co-rotation. Ces résultats sont en accord avec une analyse statistique de la vitesse de dérive calculée par l'instrument EDI (voir sa description dans le Chapitre 2) à bord de CLUSTER et effectuée par Matsui et al. [2003]. Ils sont également cohérents avec les vitesses des ions H^+ mesurées par l'instrument CIS, utilisé dans son mode RPA (description de l'instrument dans le Chapitre 2), qui montrent un mouvement des structures de densité dans la direction de co-rotation [Dandouras, communication personelle, 2003]. Par ailleurs, l'ordre de traversée de la structure par les quatre satellites est approximativment le même entre l'entrée et la sortie, ce qui montre que cette structure est simplement en rotation avec le plasma autour de la Terre.

En renouvelant cette même analyse avec d'autres structures de densité à petite échelle observées dans cette plasmasphère, nous pouvons conclure que la plupart d'entre elles se déplacent avec une vitesse azimutale de l'ordre de 1.5 à 2.0 km/s dans une direction ayant une petite composante Z, ce qui correspond plus ou moins à la direction de co-rotation. Il est intéressant de noter que l'instrument STAFF (description dans le Chapitre 2) observe une bonne corrélation entre ces structures de densités et des ondes de type sifflements. Une étude plus poussée dans

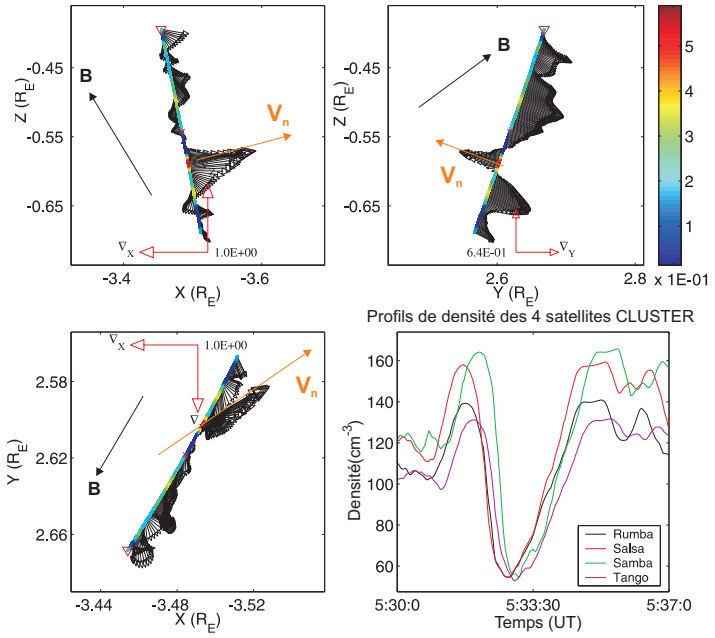

Figure 12.2: *Gradient de densité projeté dans les plans XZ, YZ et XY GSE durant la traversée d'une structure de densité à petite échelle observée le 11 Avril 2002. La vitesse normale de frontière entrante, estimée à 05:32 UT, est représentée par les flèches oranges, et la direction du champ magnétique par les flèches noires.*

cette direction permettra de voir le côté systématique ou non de cette correspondance.

Il n'est pas possible d'effectuer de comparaison avec les données EUV de la mission IMAGE, car cet instrument ne peut pas résoudre des structures de taille inférieure à 0.1 R_E, et en raison de la méthode de mesure: intégration du signal le long de la ligne de visée.

12.2 Conclusions

Nous avons vu que dans le cas d'une bonne corrélation, spatiale et temporelle, entre les quatre satellites CLUSTER, il est possible d'appliquer différents outils d'analyse multipoints, et d'en déduire des caractéristiques de structures de densité à petite échelle. Nous avons pu comparer nos résultats obtenus avec ces méthodes multipoints avec d'autres mesures directes, qui nous montrent une bonne correspondance entre les résultats.

CHAPITRE 13

Panaches Plasmasphériques

La mission CLUSTER permet d'étudier certaines structures caractéristiques de la plasmasphère, telles que les panaches. Ainsi, dans le cas d'une distance de séparation petite, des outils d'analyse à quatre points peuvent être appliquées aux données de différents instruments afin de déterminer l'orientation et le déplacement de ces panaches. Cette étude peut être complétée par les vues globales de la plasmasphère fournies par l'instrument EUV à bord de la mission IMAGE. Les résultats obtenus peuvent ensuite être comparés avec des simulations numériques de la position de la plasmapause [Darrouzet et al., 2006a].

13.1 7 Mai 2002

13.1.1 Observations avec CLUSTER

Cette première traversée de plasmasphère a lieu le 7 Mai 2002, entre 08:20 et 11:00 UT, à 20:00 MLT et avec une valeur maximum de l'indice géomagnétique K_p dans les précédentes 24 heures égale à 3. La distance de séparation entre les quatre satellites CLUSTER est petite, de l'ordre de 150 km, et les paramètres géométriques du tétraèdre sont satisfaisants, même si celui-ci est relativement alongé: élongation E d'environ 0.8 et planéité P inférieure à 0.2. La Figure 13.1 représente par une ligne noire pleine l'orbite du satellite C1 durant cette traversée, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. Des modèles de la position de la magnétopause et du choc d'étrave, ainsi que des lignes de champ magnétique sont indiqués pour référence.

La Figure 13.2 représente des spectrogrammes temps-fréquence déterminés par les quatre instruments WHISPER durant la traversée complète de la plasmasphère. L'équateur magnétique est rencontré presque en même temps par les quatre satellites, vers 09:35 UT, comme indiqué par la présence d'intenses ondes électrostatiques. La fréquence hybride haute, F_{uh}, augmente de 15 à 50-60 kHz durant la partie entrante de la traversée, et décroît jusqu'à 15 kHz dans la partie sortante. Cette quantité, associée à la gyrofréquence électronique, F_{ce}, déterminée par le sondeur, permet de déduire la fréquence plasma électronique, F_{pe}, à partir de la relation 2.1. On en déduit enfin la densité électronique N_e à l'aide de l'équation 2.2.

Il est à noter que les satellites traversent la plasmasphère, mais ne pénètrent pas profondémment à l'intérieur de celle-ci. Cela est confirmé par la valeur maximum de F_{pe} relativement petite (une fréquence plasma de 60 kHz correspond à une densité de 45 cm^{-3}). Une structure de

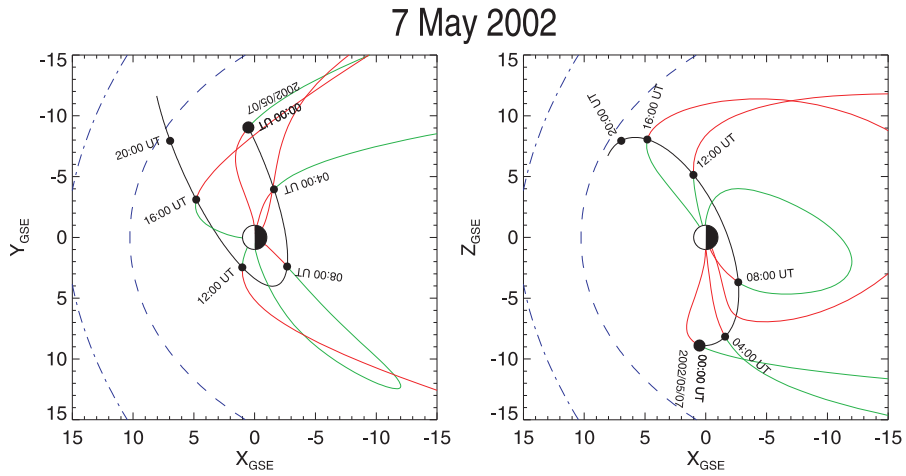

Figure 13.1: *Projection de l'orbite du satellite C1 dans les plans XY et XZ GSE durant la traversée de plasmasphère du 7 Mai 2002, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. La ligne bleue en pointillé indique la position de la magnétopause, alors que le choc d'étrave est tracé en bleu point-pointillé. Une ligne de champ magnétique a été tracée toutes les 4 heures vers la magnétopause ou vers la Terre: les lignes parallèles au champ magnétique (direction Sud-Nord) sont tracées en vert, alors que les lignes anti-parallèles (direction Nord-Sud) le sont en rouge (D'après le groupe de travail CLUSTER-SOL,* `http://ion.le.ac.uk/~cluster/orbit_plots.html`*).*

densité est observée par les quatre satellites durant la traversée entrante aux alentours de 08:35 UT. Cependant aucune structure significative n'est observée durant la partie sortante de cette traversée. Les données IMAGE, présentées dans la Section 13.1.2, confirmeront qu'il s'agit bien d'un panache plasmasphérique (indiqué sur la Figure 13.2 par le label IP, pour "Inbound Plume" ou Panache Entrant).

Les profils de densité électroniques des quatre satellites CLUSTER durant la traversée du panache sont représentés sur la Figure 13.3 en fonction de la distance R_{equat} (voir la description de ce paramètre dans l'Annexe A). Les quatre courbes sont très semblables, ce qui montre que le panache a une taille caractéristique plus grande que la distance de séparation entre les satellites. Ainsi l'hypothèse d'une surface localement planaire utilisée dans les méthodes d'analyse à quatre points (voir la Partie II) est pleinement justifiée pour cet événement. Cependant, C1 observe la partie extérieure du panache à une distance un peu plus éloignée que les trois autres satellites. Cette différence pourrait provenir des latitudes différentes des quatre satellites (ce qui pourrait expliquer la différence systématique en densité), mais aussi du mouvement vers l'extérieur de la structure de densité durant cet intervale de temps (C1 traverse le panache 1 minute avant les trois autres satellites). Par ailleurs, les satellites ne croisent pas le panache exactement dans le même secteur MLT, ce qui peut également expliquer cette différence, en particulier si les structures de densité ne sont pas parfaitement paralèles aux lignes de champ magnétique. On peut également noter que l'ordre temporel de traversée du panache est le même entre le côté intérieur et le côté extérieur du panache (voir Figure 13.6d), ce qui est cohérent avec une structure se déplaçant régulièrement par rapport aux satellites.

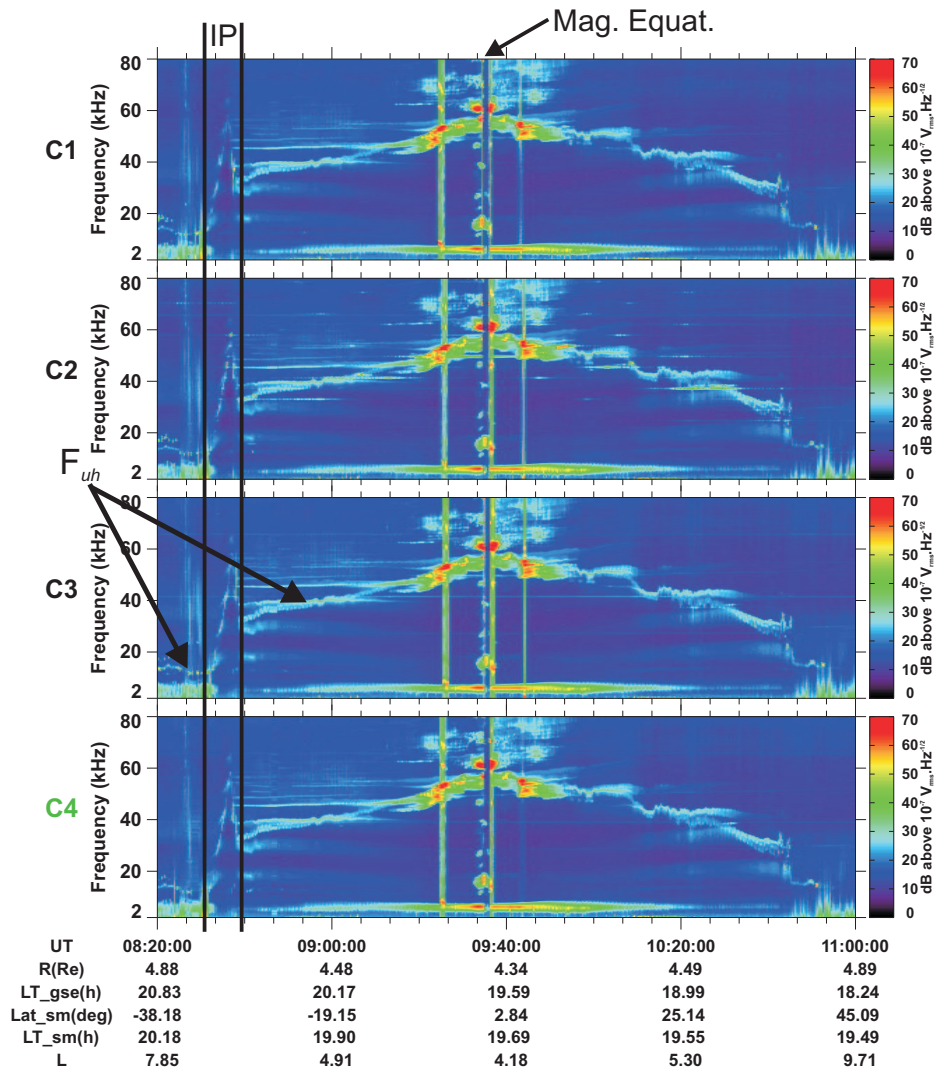

Figure 13.2: *Spectrogrammes temps-fréquence du 7 Mai 2002 entre 08:20 et 11:00 UT déterminés par l'instrument WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER. Toute la traversée de la plasmasphère est montrée, incluant un panache durant la traversée entrante (IP) ainsi que l'équateur magnétique (Mag. Equat.). La fréquence hybride haute, F_{uh}, est indiquée par les flèches noires; les paramètres d'orbite sont ceux de C4.*

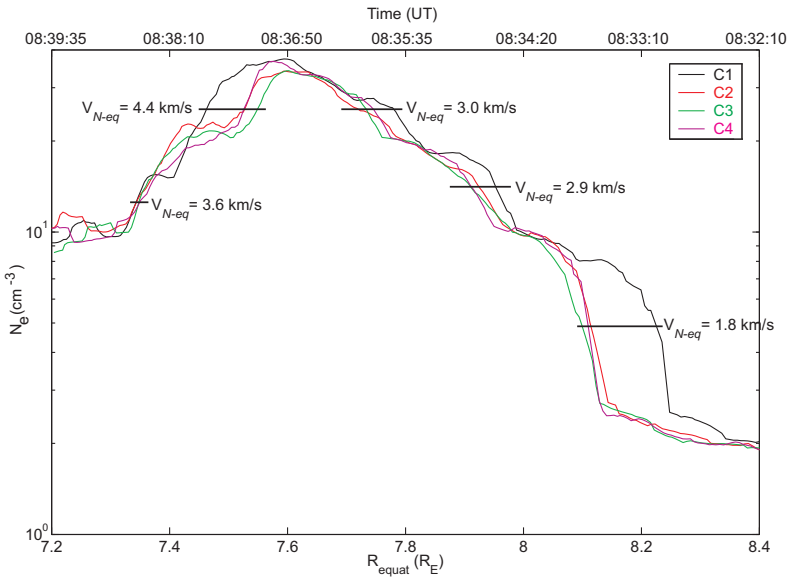

Figure 13.3: *Densité électronique du panache déterminé par les quatre instruments WHISPER pour le 7 Mai 2002 en fonction de R_{equat} et du temps. La magnitude des vitesses normales de frontière V_{N-eq} dérivées à partir des délais entre les satellites évalués à différents instants, puis projetées dans le plan équatorial, est indiquée sur la figure.*

Nous avons utilisé la méthode des délais présentée dans le Chapitre 7 pour déterminer la vitesse normale de la frontière du panache, puis la méthode de projection décrite dans l'Annexe C pour déduire leur projection dans le plan équatorial magnétique. La frontière externe du panache, vers 08:34 UT et 8 R_E, possède une vitesse normale projetée V_{N-eq} = 2.3 $\pm$ 0.5 km/s. Par ailleurs, l'angle ϕ entre la normale de la frontière extérieure et la direction radiale (déterminé à partir de la direction du gradient spatial de densité, puis confirmé par la direction de la vitesse normale de frontière) est environ 15°. Si le plasma se déplace uniquement dans la direction azimutale, cela implique une vitesse azimutale equatoriale V_{P-eq} = 8.8 $\pm$ 2.0 km/s (voir explication de cette technique dans l'Annexe D). Cette valeur est beaucoup plus élevée que la vitesse projetée de co-rotation V_{C-eq} = 3.7 km/s (voir également l'Annexe D). La vitesse azimutale pourrait être plus petite s'il y avait également un mouvement du plasma vers l'extérieur; par exemple pour la frontière extérieure de ce panache, une vitesse azimutale V_{P-eq} = 3.7 km/s associée à une vitesse radiale V_{R-eq} = 1.3 km/s serait également compatible avec une vitesse normale N_{P-eq} = 2.3 km/s dans une direction faisant un angle de 15° avec la direction radiale. La frontière intérieure, vers 08:38 UT et 7.5 R_E, se déplace avec V_{N-eq} = 3.6 $\pm$ 0.5 km/s. Avec $\phi \approx 30°$, nous obtenons V_{P-eq} = 7.2 $\pm$ 1.0 km/s, qui est également supérieur à V_{C-eq} (3.3 km/s). Cela suggère des déviations par rapport à la co-rotation, avec la frontière externe se déplaçant plus rapidement que la frontière interne.

La Figure 13.4 représente des spectrogrammes temps-énergie de l'instrument CIS en mode RPA, qui dans ce cas mesure la distribution des ions dans la bande d'énergie 0.7$-$25 eV/q (par rapport au potentiel du satellite). Les panneaux (a), (b) et (c) concernent respectivement les ions H^+, He^+ et O^+, alors que le panneau (d) est la distribution en pitch-angle des ions H^+. Le pa-

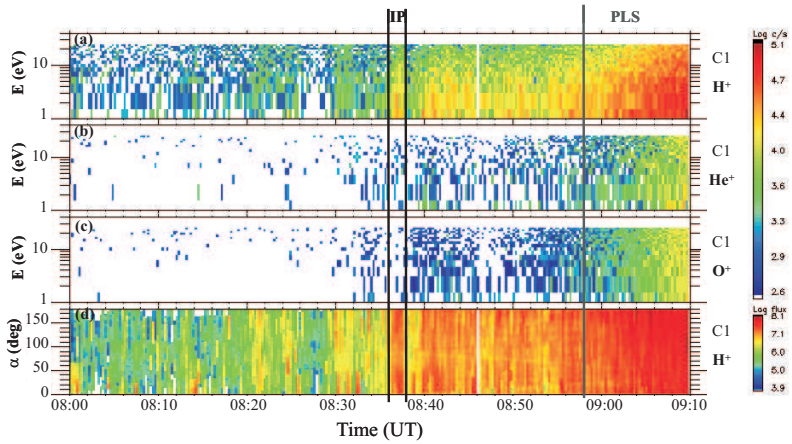

Figure 13.4: *Spectrogrammes temps-énergie de l'instrument CIS en mode RPA durant la traversée entrante de la plasmasphère du 7 Mai 2002. (a), (b) et (c) donnent la distribution des ions H^+, He^+ et O^+ respectivement, alors que (d) est la distribution en pitch-angle des ions H^+.*

nache IP, observé entre 08:36 et 08:38 UT, est principalement composé de protons avec un flux isotropique et de quelques traces d'ions He^+, alors qu'aucun ion O^+ n'est détecté. La valeur de densité obtenue à partir de CIS dans le panache est inférieure à celle obtenue par WHISPER. Cela est principalement du au fait que le spectromètre ne détecte pas les particules d'énergie inférieure à 1 eV (par rapport au potentiel du satellite), alors que cela correspond à la gamme d'énergie d'une grande partie de la population présente dans cette région [Dandouras et al., 2005]. L'instrument CIS détermine également la vitesse des ions H^+, V_H. Afin de contourner les problèmes d'estimation de vitesse dans la direction de l'axe de rotation du satellite, nous avons supposé que la vitesse des ions était dans une direction perpendiculaire au champ magnétique. Nous avons ensuite projeté cette vitesse dans le plan équatorial magnétique, avec la méthode décrite dans l'Annexe C. A l'intérieur de la plasmasphère, cette projection équatoriale $\boldsymbol{V_{H-eq}}$ est dans la direction azimutale de ce secteur de MLT (avant-minuit). Par contre, à l'intérieur du panache, les ions vont dans la direction opposée à la co-rotation. Cela suggère que les ions H^+ sont en co-rotation à l'intérieur de la plasmasphère, mais pas dans le panache, où ils se déplacent également vers l'extérieur, c'est-à-dire en s'éloignant de la Terre.

La vitesse de dérive électronique mesurée par l'instrument EDI, puis projetée dans le plan équatorial, $\boldsymbol{V_{D-eq}}$, est dessinée sur la Figure 13.5 pour les satellites C1, C2 et C3 en fonction du temps de traversée de cette plasmasphère. Les trois composantes ont une structure ondulatoire, durant presque toute la traversée, avec une période de 100 secondes. Ces oscillations n'étant pas observées sur les profils de densité, ces ondes non-compressionnelles pourraient donc être des ondes d'Alfvén. Quand les satellites sont à l'intérieur de la plasmasphère, entre 09:00 et 10:15 UT, c'est-à-dire pour R_{equat} inférieur à 6 R_E, la magnitude moyenne de la vitesse de dérive est V_{D-eq} = 2.1 $\pm$ 0.2 km/s. Cette valeur est proche de la vitesse de co-rotation V_{C-eq} = 2.2 $\pm$ 0.2 km/s, et dirigée principalement dans la direction azimutale. Ces résultats confirment que la plasmasphère interne est principalement en co-rotation autour de la Terre, ce qui est en

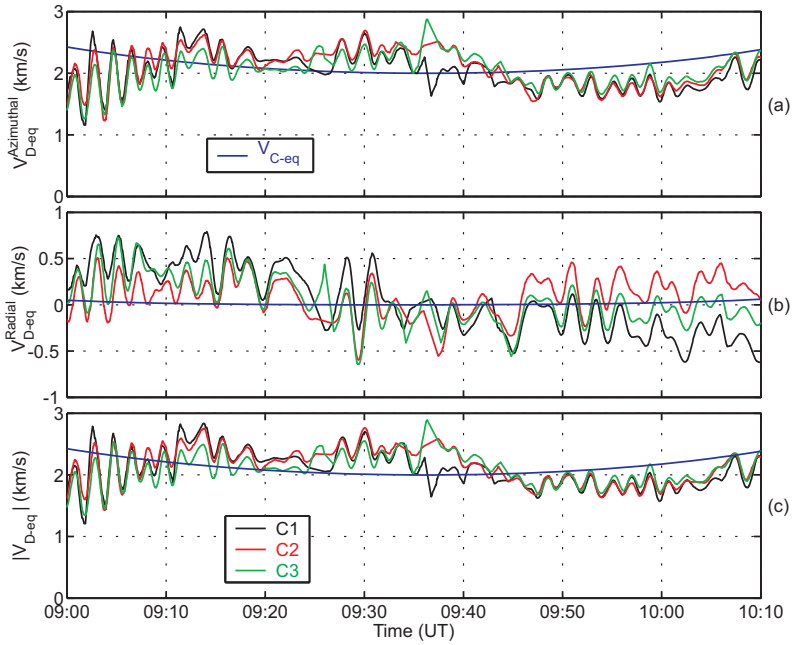

Figure 13.5: *Vitesse de dérive électronique $\boldsymbol{V_{D-eq}}$ mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique, représentée par ses composantes azimutales (a), radiale (b) et sa magnitude (c) en fonction du temps pour les satellites C1, C2 et C3 durant la traversée de la plasmasphère du 7 Mai 2002, avec la vitesse de co-rotation $\boldsymbol{V_{C-eq}}$ également projetée dans le même plan (lignes bleues).*

accord avec les vitesses mesurées par CIS. La vitesse de dérive dévie de la vitesse de co-rotation lorsque l'on s'éloigne de l'axe de rotation de la Terre.

La Figure 13.6 montre un zoom sur la traversée du panache, avec les vitesses de dérive mesurées par EDI sur les panneaux (a)-(c), et la densité électronique de WHISPER sur le panneau (d). Pour la partie extérieure du panache (entre 08:32 et 08:37 UT), $\boldsymbol{V_{D-eq}}$ est dans la direction azimutale mais aussi radiale ($\approx$ 2.5 km/s), avec une magnitude moyenne beaucoup plus élevée que la vitesse de co-rotation (V_{D-eq} = 8.5 $\pm$ 1.0 km/s alors que V_{C-eq} = 3.8 $-$ 3.4 km/s), ce qui correspond à une rotation différentielle. Cependant, au niveau du gradient de densité du panache le plus proche de la plasmasphère (entre 08:37 et 08:39 UT), la vitesse de dérive est plus proche de la vitesse de co-rotation, en terme de direction et magnitude.

En regardant les données magnétiques dans le panache fournies par l'instrument FGM, nous n'observons pas de modification de la magnitude de $\boldsymbol{B}$ dans le panneau (e) de la Figure 13.6), alors qu'il existe une variation de son orientation (panneaux (f)-(h)). On constate une rotation graduelle de $\boldsymbol{B}$ de 5° jusqu'à l'instant de densité maximale dans le panache (08:34 $-$ 08:37 UT), et ensuite $\boldsymbol{B}$ retourne rapidement à son orientation d'origine (08:37 $-$ 08:39 UT). En raison des différences importantes entre les quatre satellites dans les composantes du champ magnétique entre 08:36 et 08:39 UT, la condition d'homogénéité n'est plus satisfaite et il n'est donc pas possible de calculer le gradient spatial de ces composantes. Ainsi, il n'est donc pas possible d'estimer dans cette partie du panache, la densité de courant électrique avec cette méthode multipoint. En dehors de cette région, et notamment à l'intérieur de la plasmasphère, la densité de courant électrique peut être calculée en utilisant l'outil gradient spatial appliqué aux composantes du champ magnétique (voir description de la méthode dans l'Annexe B): la densité de courant est ici très petite, de l'ordre de 20 nA/m^2.

13.1.2 Observations avec IMAGE et LANL

La Figure 13.7 montre une image de la plasmasphère prise par l'instrument EUV à 08:31 UT le 7 Mai 2002 (aux environs de l'instant de traversée du panache par les satellites CLUSTER). C'est une image plein-écran réduite à la zone d'étude, puis projetée dans le plan dipolaire magnétique équatorial, en utilisant la méthode décrite dans le Chapitre 3. Le Soleil se situe vers la droite de l'image; la position et la taille de la Terre sont indiquées par le disque blanc au centre de l'image; l'ombre de la Terre s'étend à travers la plasmasphère dans la direction anti-solaire (vers la gauche sur cette figure). Les satellites CLUSTER sont situés à 20:00 MLT, dans le coin supérieur gauche de l'image.

Un panache mince mais étendu est observé sur l'image EUV, à partir du secteur de l'après-minuit (01:00 MLT) jusqu'au secteur du soir (20:00 MLT). Le panache n'est pas très clairement visible en raison de son niveau de densité (valeur maximum de 40 cm^{-3} observée par WHISPER), qui est très proche du seuil de l'instrument EUV (40 $\pm$ 10 électrons cm^{-3}), mais en regardant des séquences d'images consécutives, nous pouvons voir clairement sa forme globale. Par ailleurs, l'image montre que le centre du panache s'étend de 5.5 à 7.7 R_E au niveau de son extrémité, et que sa taille transversale possède une valeur maximale de 0.7 R_E. A 08:31 UT et 20:00 MLT, le panache se situe entre 7.0 et 7.7 R_E dans les images EUV intégrées le long de la ligne de visée, ce qui est cohérent avec le panache observé par WHISPER entre 08:32 et

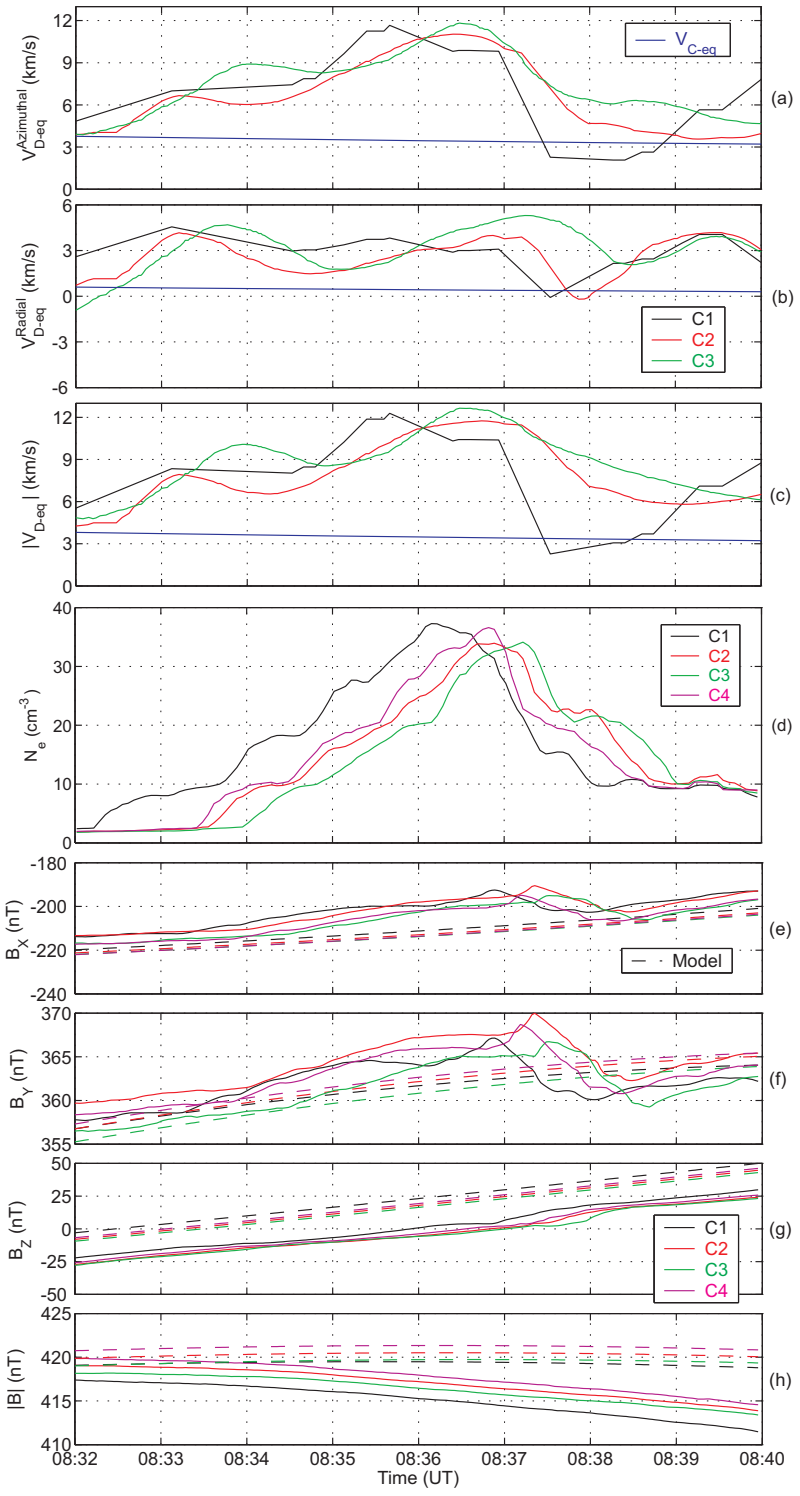

Figure 13.6: *Différentes quantités représentées en fonction du temps durant la traversée du panache du 7 Mai 2002: (a)-(c) vitesse de dérive électronique mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique (similaire à la Figure 13.5); (d) densité électronique déterminée par WHISPER; (e)-(h) composantes et magnitude en GSE du champ magnétique mesuré par FGM (lignes pleines) et du champ déterminé à partir des modèles IGRF2000 et Tsyganenko-96 (lignes pointillées).*

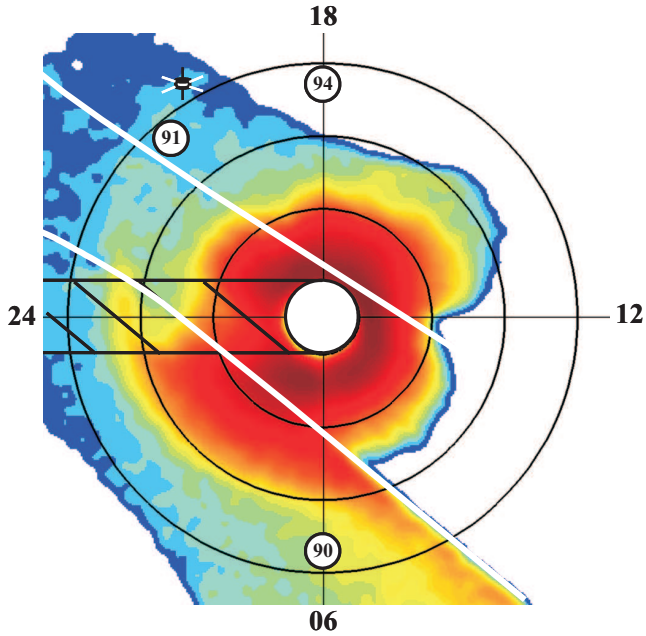

Figure 13.7: *Projection d'une image plein-écran d'EUV dans le plan équatorial magnétique à 08:31 UT le 7 Mai 2002. Le disque blanc au centre de l'image correspond à taille et position de la Terre, avec son ombre s'étendant à travers la plasmasphère dans la direction anti-solaire. Les trois larges cercles correspondent à R_{equat} = 3, 5 et 7 R_E. Les deux lignes blanches correspondent aux limites entres les trois caméras d'EUV. La position des satellites CLUSTER est indiquée sur l'image EUV, ainsi que la position de trois satellites géosynchrones: LANL 1990-095, LANL 1991-080 et LANL 1994-084.*

08:40 UT et à 20:00 MLT à une distance équatoriale R_{equat} comprise entre 7.3 et 8.2 R_E.

Le panache est observé pour la première fois sur les images EUV autour de 04:00 UT, avec son pied attaché à la plasmasphère vers 20:00 MLT. Il est visible jusqu'à 10:00 UT, avec le pied situé autour de 01:30 MLT. En dehors de cet intervalle de temps, les images EUV ne sont pas de qualité suffisante, ou alors le satellite IMAGE se trouve trop près de la Terre pour voir la plasmasphère entièrement. Ces valeurs nous donnent une vitesse approximative du pied du panache (à 4 R_E) de l'ordre de la vitesse de co-rotation (V_{C-eq} = 1.9 km/s). Cependant, le même type d'analyse effectué sur l'extrémité du panache (entre 07:20 et 09:20 UT) nous donne une valeur de l'ordre de la moitié de la vitesse de co-rotation, avec par ailleurs un léger accroissement dans la direction radiale d'environ 0.3 R_E durant cet intervalle de temps (c'est-à-dire une vitesse vers l'extérieur d'environ 0.3 km/s). Cela signifie que le panache tourne autour de la Terre, avec le pied attaché à la plasmasphère en co-rotation, et l'extrémité tournant plus lentement et s'éloignant de la Terre. Ces résultats sont cohérents avec les résultats obtenus avec CLUSTER décrits dans la Section 13.1.1, mais aussi avec des études précédentes sur les panaches plasmasphériques [Spasojević et al., 2003; Darrouzet et al., 2004].

Les satellites géosynchrones LANL 1991-080 et LANL 1994-084 observent une augmentation de la densité ionique dans la même région que CLUSTER et IMAGE: LANL 1991-080 enregistre une densité maximale de 35 cm^{-3} autour de 09:00 – 09:30 UT à 22:00 MLT et LANL 1994-084 observe la même densité entre 11:00 et 11:15 UT à 21:00 MLT. LANL 1990-095, situé vers 06:00 MLT à 08:30 UT, n'observe aucune structure de densité (la position des 3 satellites est indiqué sur la Figure 13.7). Ces observations confirment la présence d'un panache étroit de densité maximale relativement faible, à une distance équatoriale d'environ 7 R_E, dans le secteur MLT d'avant minuit, ce qui est cohérent avec les observations de CLUSTER et d'IMAGE.

13.1.3 Simulations numériques

La Figure 13.8 montre à différents instants la position de la plasmapause dans le plan équatorial magnétique, déterminée à partir d'une simulation numérique basée sur le mécanisme d'interchange (voir Chapitre 4 pour la description de ce mécanisme). Les panneaux de gauche fournissent la composante Z de l'IMF (B_Z) ainsi que deux indices d'activité géomagnétique, Dst et K_p (voir leur définition dans l'Annexe A), durant la simulation. Sur les quatre panneaux de la partie droite de la figure, le Soleil se situe sur la droite et les cercles correspondent à L = 2, 3, 4 et 5 R_E. Les points bleus représentent les positions successives d'éléments tests de plasma lancés dans la simulation à partir du secteur après-minuit toutes les 10 minutes. Ces points identifient les positions équatoriales de la plasmapause formée près de 02:00 MLT par le mécanisme d'interchange. La distance équatoriale où la plasmapause est formée dépend de l'évolution de l'indice K_p, qui contrôle l'intensité du champ électrique de convection suivant le modèle E5D utilisé dans ces simulations [McIlwain, 1986]. Les différents niveaux de couleur des éléments correspondent à l'époque de leur formation et de leur libération dans la simulation (les points clairs correspondent à de jeunes éléments et les points foncés à des plus anciens).

Au début de la simulation (c'est-à-dire à 05:00 UT le 6 Mai 2002, voir panneau (a)), la plasmapause est pratiquement circulaire et se trouve vers 5 R_E. Lorsque K_p augmente jusqu'à

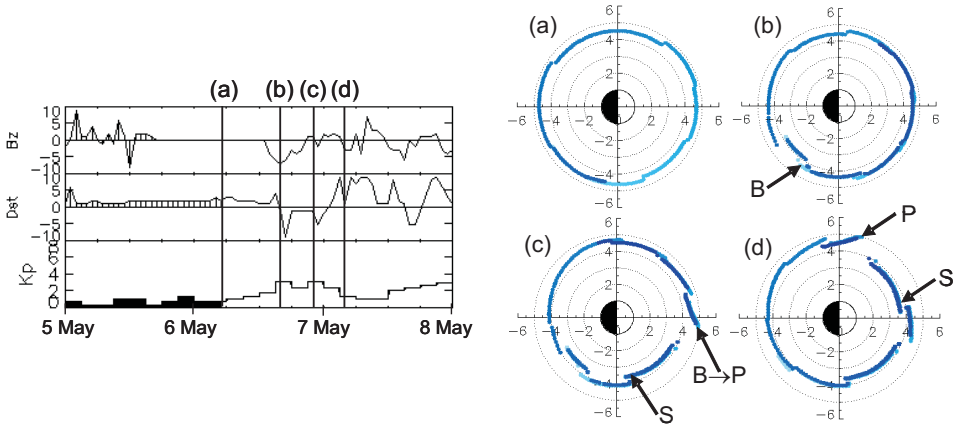

Figure 13.8: *Position prédite de la plasmapause dans le plan équatorial magnétique basée sur une simulation numérique dépendante du modèle empirique de champ électrique de convection E5D et du mécanisme d'interchange. Les panneaux de gauche donnent des indices définissant le vent solaire et l'activité géomagnétique (B_Z, Dst et K_p) durant la période de simulation. Les panneaux de droite indiquent la position de la plasmapause et l'évolution du gonflement (B) en panache (P), (a) à 05:00 UT le 6 Mai 2002, (b) à 16:00 UT le 6 Mai 2002, (c) à 22:00 UT le 6 Mai 2002, (d) à 04:00 UT le 7 Mai 2002.*

3, vers 16:00 UT le 6 Mai (panneau (b)), la plasmapause se forme plus près de la Terre dans le secteur après-minuit, ce qui crée un gonflement (labellé B) au niveau de la plasmapause dans le secteur de l'aurore. Ce gonflement est la conséquence de l'augmentation de la composante aurore-crépuscule du champ électrique en raison de l'augmentation de l'indice K_p. On peut remarquer que cela correspond également à une légère baisse de l'indice Dst, et à l'orientation vers le Sud de la composante Z du champ magnétique interplanétaire (B_Z). Ce gonflement évolue ensuite en une structure semblable à un panache (B→P), tournant autour de la Terre à travers tous les secteurs MLT avec une vitesse proche de la vitesse de co-rotation (panneau (c)). Le panache (P) se déplace également vers l'extérieur dans la direction radiale et devient de plus en plus allongé (dans le secteur du crépuscule du panneau (d)). Ce déplacement de la plasmapause et des structures la composant, à une vitesse proche de la vitesse de co-rotation est confirmé par le mouvement de la structure S ("shoulder"), qui se déplace d'environ 6 heures de MLT en 6 heures UT (entre les panneaux (c) et (d)). La formation et le mouvement du panache se distinguent plus facilement sur un film construit à partir d'images successives de la simulation. A 08:30 UT (Figure 13.9), le panache P se situe entre 22:00 et 23:30 MLT, ce qui est pratiquement le même secteur où IMAGE observe un panache. En effet, sur la Figure 13.7, le pied du panache se trouve entre 23:00 et 01:00 MLT. Il faut noter que la simulation est basée sur un indice géomagnétique ayant une résolution temporelle de 3 heures, ce qui pourrait générer un délai de $\pm$ 1.5 heures dans la formation du panache, et ainsi expliquer le décalage observé entre les deux figures.

Un autre point d'accord entre les simulations numériques et les images EUV concerne la position de la plasmapause. Cependant cette comparaison n'est possible que dans les régions où l'ombre de la Terre n'a pas d'effets néfastes sur les images EUV, et où des reflections internes

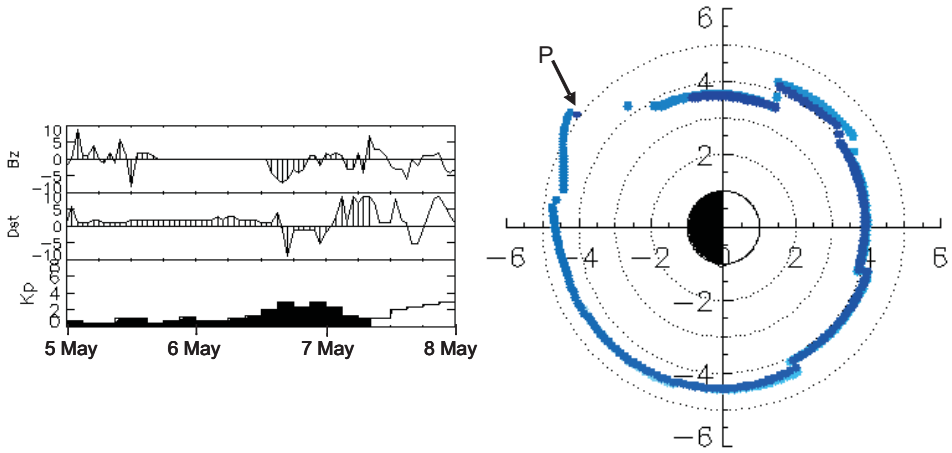

Figure 13.9: *Position prédite de la plasmapause dans le plan équatorial le 7 Mai 2002 à 08:30 UT (similaire à la Figure 13.8).*

dans les caméras ne détériorent pas les images. Ainsi, entre 01:00 et 06:00 MLT, la simulation numérique donne une plasmapause entre 5 et 4.5 R_E alors que sur les images EUV, elle se trouve entre 5.5 et 4.5 R_E. Dans le secteur MLT situé entre 18:00 et 20:00, la plasmapause est située entre 4 et 3.5 R_E d'après la simulation, et entre 4 et 3.7 R_E suivant EUV. Par ailleurs, il est difficile de distinguer la plasmapause avec les données CLUSTER car les satellites n'entrent pas complètement dans la plasmasphère. Nous pouvons cependant dire qu'autour de 20:00 MLT, elle se situe à une distance inférieure à 4.2 R_E, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus avec les simulations ou avec EUV.

13.2 2 Juin 2002

13.2.1 Observations avec CLUSTER

Ce second événement se situe le 2 Juin 2002, entre 12:00 et 14:30 UT, dans le secteur du crépuscule (18:00 MLT) et également avec une petite distance de séparation entre les satellites CLUSTER (environ 150 km). Le tétraèdre formé par les quatre satellites est relativement alongé ($E \approx 0.8$ et $P < 0.2$), mais permet cependant d'appliquer les outils d'analyse multi-points décrits dans les Chapitres 6 et 7). L'activité géomagnétique est modérée avec une valeur maximum de l'indice K_p dans les 24 heures précédentes égale à 4. La Figure 13.10 représente par une ligne noire pleine l'orbite du satellite C1 durant cette traversée, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. Des modèles de la position de la magnétopause et du choc d'étrave, ainsi que des lignes de champ magnétique, sont indiqués pour référence.

La Figure 13.11 représente les quatre spectrogrammes temps-fréquence WHISPER durant la traversée de la plasmasphère. L'équateur magnétique (Mag. Equat.) est croisé aux alentours de 13:20 UT. Un panache très large est observé par les quatre satellites durant les parties entrantes (IP) et sortantes (OP) de la traversée; IP dure plus de 30 minutes. Les traversées de panache

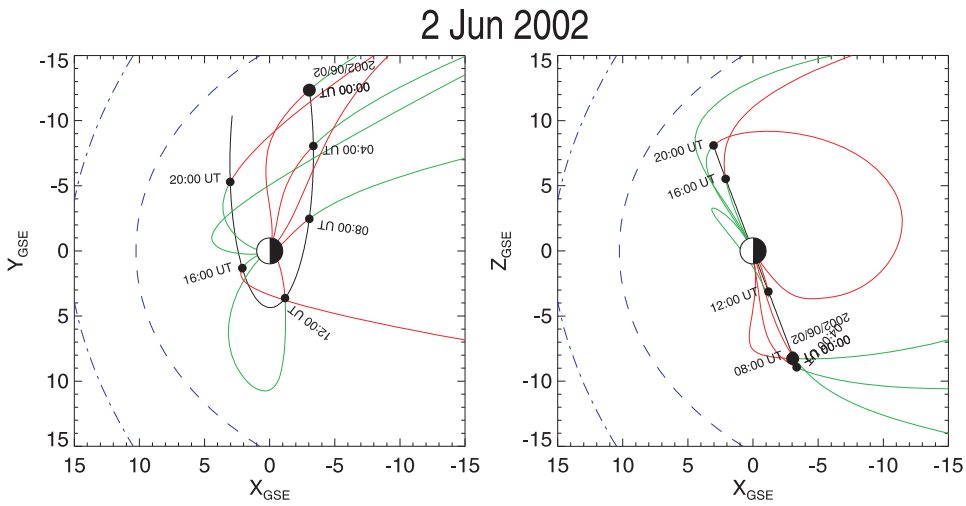

Figure 13.10: *Projection de l'orbite du satellite C1 dans les plans XY et XZ GSE durant la traversée de plasmasphère du 2 Juin 2002, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. La ligne bleue en pointillé indique la position de la magnétopause, alors que le choc d'étrave est tracé en bleu point-pointillé. Une ligne de champ magnétique a été tracée toutes les 4 heures vers la magnétopause ou vers la Terre: les lignes parallèles au champ magnétique (direction Sud-Nord) sont tracées en vert, alors que les lignes anti-parallèles (direction Nord-Sud) le sont en rouge (D'après le groupe de travail CLUSTER-SOL,* `http://ion.le.ac.uk/~cluster/orbit_plots.html`*).*

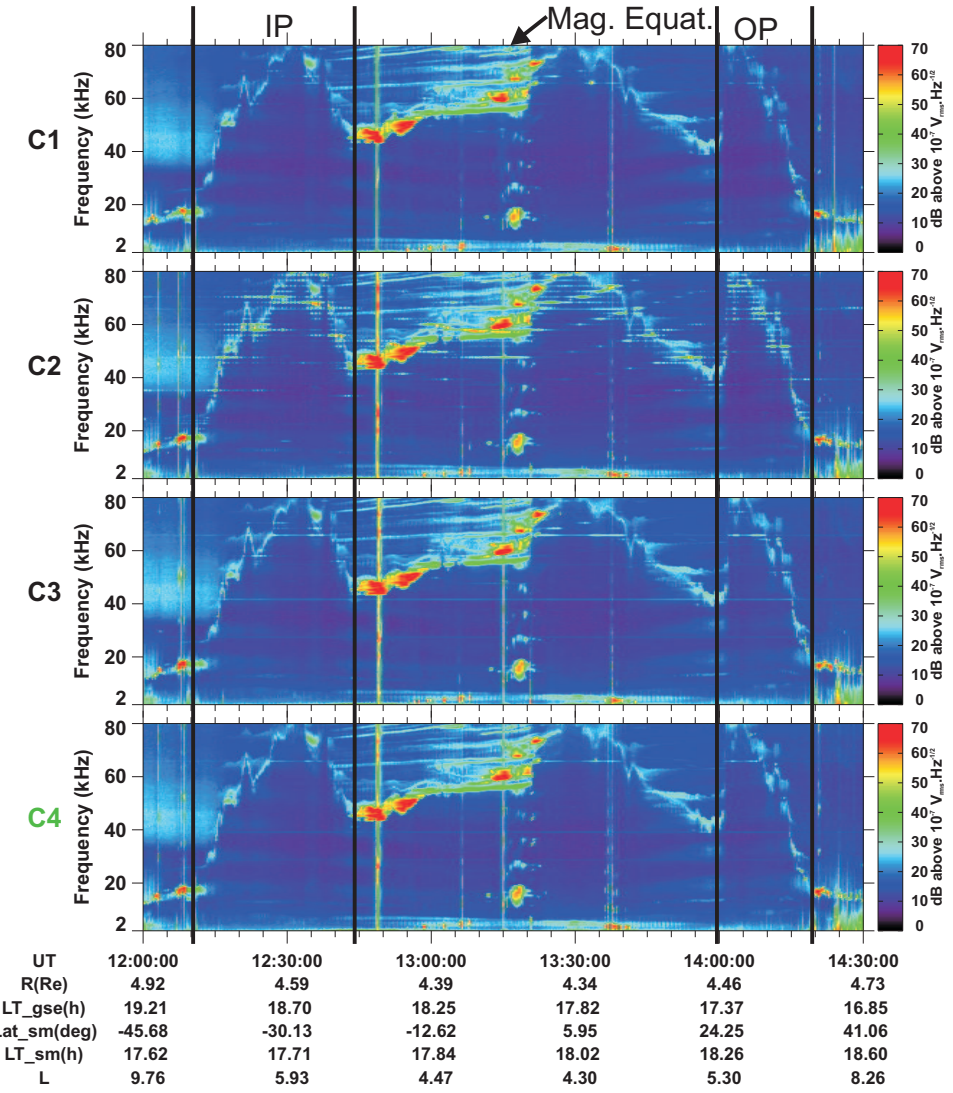

Figure 13.11: *Spectrogrammes temps-fréquence du 2 Juin 2002 entre 12:00 et 14:30 UT déterminés par l'instrument WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER. Toute la traversée de la plasmasphère est montrée, incluant un panache durant la traversée entrante (IP) et durant la traversée sortante (OP), ainsi que l'équateur magnétique (Mag. Equat.). Les paramètres d'orbite sont ceux de C4.*

sont presque identiques entre les quatre satellites (voir par exemple une petite structure dans IP à 12:20 UT et une autre dans OP à 14:10 UT). Ce panache possède une valeur maximum de F_{pe} élevée, légèrement au-dessus de 80 kHz.

La Figure 13.12 représente les profils de densité électronique en fonction de R_{equat} durant les deux traversées du panache. Ces profils sont déterminés par WHISPER, mais aussi par EFW pour les parties au-dessus de 80 kHz. Les deux structures ont le même profil, ce qui confirme qu'il s'agit bien du même panache traversé par les satellites à des latitudes Sud et Nord de la plasmasphère. La similitude des profils entre IP et OP suggère que le panache n'a pas beaucoup bougé en terme de R_{equat} durant les 2 heures entre les deux passages. Cela est confirmé par les valeurs de la vitesse normale de frontière (déterminée avec la méthode des délais, Chapitre 7), projetée dans le plan équatorial magnétique, V_{N-eq}, qui sont représentées sur la Figure 13.12. Ces vitesses sont relativement petites pour la traversée entrante du panache (plus importantes dans la zone externe que dans la zone interne). L'angle ϕ entre la normale de la frontière extérieure du panache entrant et la direction radiale (déterminé à partir de la direction du gradient spatial de densité, puis confirmé par la direction de la vitesse normale de frontière) est environ 10°, V_{N-eq} = 1.2 $\pm$ 0.2 km/s, ce qui donne V_{P-eq} = 6.9 $\pm$ 1.2 km/s dans l'hypothèse où la vitesse est azimutale, sans composante radiale. Pour le côté interne du panache entrant, V_{N-eq} = 0.7 $\pm$ 0.2 km/s, $\phi \approx$ 10°, ainsi V_{P-eq} = 4.0 $\pm$ 1.2 km/s. Ces valeurs sont supérieures à la vitesse de co-rotation, V_{C-eq}, qui est entre 3.6 et 2.8 km/s pour cette position de satellites. Ceci pourrait également être compatible avec une vitesse azimutale plus petite s'il y avait en même temps un mouvement radial du plasma. Pour la traversée sortante, les vitesses de frontières sont différentes entre les deux côtés du panache. Pour la zone externe, V_{N-eq} = 4.2 $\pm$ 0.8 km/s, $\phi \approx$ 30°, alors V_{P-eq} = 8.4 $\pm$ 1.6 km/s, alors que pour la zone interne, V_{N-eq} = 1.1 $\pm$ 0.3 km/s, $\phi \approx$ 30°, ainsi V_{P-eq} = 2.2 $\pm$ 0.6 km/s. Comme dans le cas précédent, il y a des déviations par rapport à la vitesse de co-rotation.

En remarquant que les satellites restent approximativement dans le même secteur MLT, nous pouvons en déduire une vitesse radiale moyenne, V_{IO-eq}, qui correspond au déplacement en R_{equat} d'une structure entre les traversées entrantes et sortantes. Ainsi, en comparant les deux traversées, on peut observer que la zone interne du panache s'est déplacée de 0.5 R_E en 75 minutes, ce qui donne une vitesse V_{IO-eq} = 0.7 $\pm$ 0.1 km/s. Cette valeur est comparable à la vitesse radiale de frontière projetée dans le plan équatorial, V_{R-eq}, qui est de 0.7 $\pm$ 0.2 km/s pour la traversée entrante, et de 1.3 $\pm$ 0.2 km/s pour la traversée sortante. Pour la zone externe du panache, V_{IO-eq} = 0.5 $\pm$ 0.1 km/s, alors que la méthode des délais donne une valeur de V_{R-eq} égale à 1.2 $\pm$ 0.2 km/s pour la traversée entrante et 4.8 $\pm$ 0.5 km/s pour la traversée sortante. Ces résultats suggèrent que le panache est plus étroit dans l'hémisphère Nord (traversée sortante) que dans l'hémisphère Sud (traversée entrante), et que la zone interne du panache se situe à une plus grande distance équatoriale. Cela montre également que les mesures instantanées sont en accord avec le mouvement à long terme du panache plasmasphérique.

Les données de l'instrument CIS en mode RPA (0.7 $-$ 25 eV/q) sont représentées sur la Figure 13.13 pour C1 et C3. Les panneaux (a)-(b) et (c)-(d) montrent la distribution en énergie de H^+ et He^+ pour C1 et C3 respectivement. La densité ionique déterminée par C1 et C3 est affichée sur le panneau (e). Les satellites CLUSTER entrent à l'intérieur de la plasmasphère à 12:45 UT, et en ressortent à 13:55 UT, comme indiqué par la densité ionique plus importante

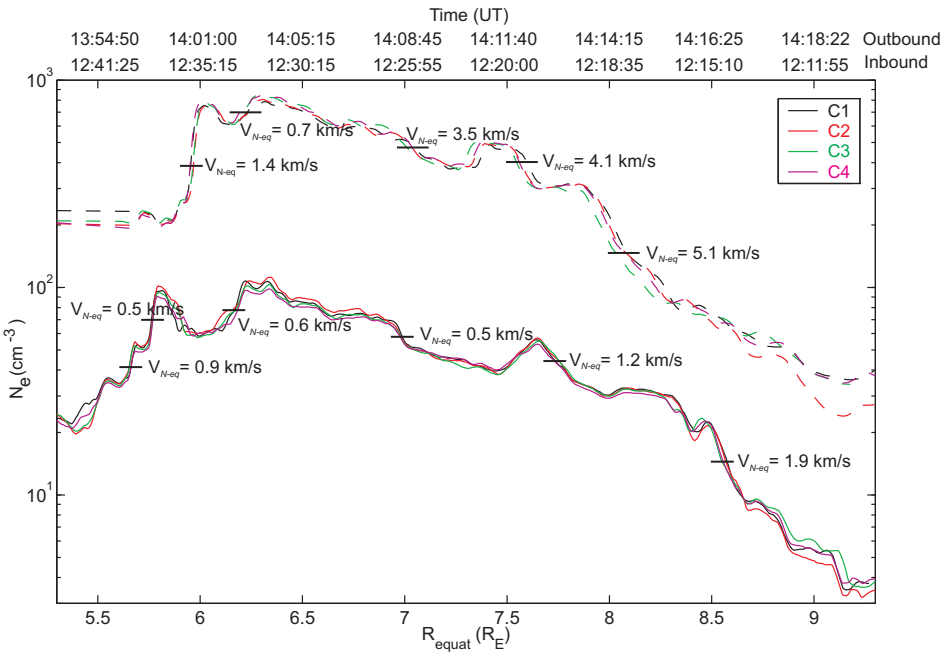

Figure 13.12: *Densité électronique du panache déterminée par les quatre instruments WHISPER pour le 2 Juin 2002 en fonction de R_{equat} et du temps. Les quatre courbes en trait plein dans le bas de la figure correspondent à la densité durant la traversée entrante du panache, alors que celles correspondant à la traversée sortante ont leur densité multipliée par un facteur 10 pour augmenter la clarté de la figure (traits pointillés). La magnitude des vitesses normales de frontière V_{N-eq} dérivées à partir des délais entre les satellites évalués à différents instants, puis projetées dans le plan équatorial, est indiquée sur la figure.*

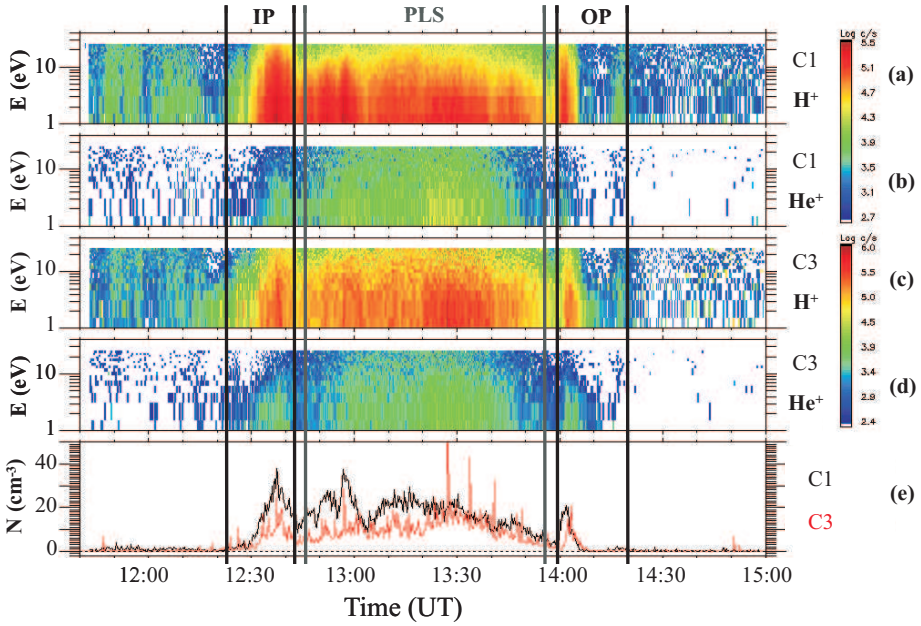

Figure 13.13: *Spectrogrammes temps-énergie de l'instrument CIS en mode RPA durant toute la traversée de la plasmasphère du 2 Juin 2002 pour C1 et C3. Les panneaux (a) et (b) donnent la distribution des ions H^+ et He^+ pour C1, alors que les mêmes données pour C3 sont indiquées sur les panneaux (c) et (d). Le panneau (e) fournit la densité des ions H^+ pour C1 (noir) et C3 (rouge).*

dans cette région (PLS). Les panaches sont clairement observés sur les spectrogrammes H^+, entre 12:20 et 12:45 UT pour le panache entrant (IP), et entre 14:00 et 14:20 UT pour le panache sortant (OP). Le panache sortant semble être divisé en deux parties, avec une densité ionique plus basse entre les deux. Ce creux de densité correspond à la décroissance de densité électronique observée par WHISPER vers 14:10 UT ($R_{equat} \approx 7.2\ R_E$). Les traversées de panache semblent être plus courtes sur les spectrogrammes He^+, en raison des faibles densités au niveau des zones externes du panache. Les valeurs de densité obtenues par CIS/CODIF en mode RPA sont plus faibles que celles déterminées par WHISPER à cause de la bande d'énergie de l'instument, qui ne couvre pas l'ensemble des énergies des ions présents dans cette région (comme on peut le voir sur la Figure 13.13a-c), mais également à cause de la charge électrique des satellites. A l'intérieur de la plasmasphère, la vitesse des ions H^+ projetée dans le plan équatorial $\boldsymbol{V_{H-eq}}$ est azimutale. Cependant, durant la traversée entrante du panache, la composante radiale est plus importante, ce qui signifie que le panache s'éloigne de la Terre. Pour le panache sortant, aucune conclusion ne peut être déduite, car il y a de grandes différences entre les satellites C1 et C3.

Les composantes de la vitesse de dérive déterminée par EDI sont indiquées sur les Figures 13.14a-c et 13.15a-c pour les satellites C1, C2 et C3, pour les deux traversées de panache. Aux environs du maximum de densité (12:25 $-$ 12:35 UT, et 14:07 $-$ 14:13 UT), les composantes de la vitesse ont une structure ondulatoire, mais pas aussi quasi-monochromatique que dans le premier événement discuté dans le Paragraphe 13.1.1. Ces données suggèrent à nouveau que ces oscillations non-compressionnelles pourraient être des ondes d'Alfvén. Durant la traversée entrante du panache (voir Figure 13.14), la vitesse de dérive projetée dans le plan équatorial est V_{D-eq} = 3.5 $\pm$ 1.0 km/s, principalement dans la direction azimutale, mais aussi avec une expansion radiale du panache (0.9 km/s). Cette vitesse est de l'ordre de la vitesse de co-rotation (3.6 $-$ 2.4 km/s). Concernant la traversée sortante du panache (voir Figure 13.15), V_{D-eq} = 5.5 $\pm$ 1.0 km/s, globalement dans la direction de co-rotation. Ce résultat est cohérent avec les valeurs de vitesse déterminées par WHISPER plus importantes dans le panache sortant. A l'intérieur de la plasmasphère (12:50 $-$ 13:50 UT, R_{equat} = 4.4 $-$ 5.3 R_E), V_{D-eq} = 2.0 $\pm$ 0.2 km/s, dans la direction de corotation, et proche de la vitesse de co-rotation (V_{C-eq} = 2.0 $-$ 2.3 km/s).

Pour cet événement, nous n'observons aucun changement dans la direction du champ magnétique, ainsi qu'aucun effect diamagnétique à l'intérieur du panache plasmasphérique. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le gradient de densité électronique n'est pas très important sur les côtés du panache (l'augmentation de densité de quelques cm^{-3} jusqu'à envion 80 cm^{-3} dure 20 minutes, ce qui représente environ une distance d'1 R_E). Par ailleurs, il n'y a pas d'augmentation de la densité de courant électrique à l'intérieur des panaches, comme à l'intérieur de la plasmasphère.

13.2.2 Observations avec IMAGE et LANL

La Figure 13.16 représente une image prise par l'instrument EUV à 12:33 UT le 2 Juin 2002 (aux environs de l'instant de traversée entrante du panache par les satellites CLUSTER), puis projetée sur le plan équatorial du dipole magnétique. Un très large panache est observé dans le

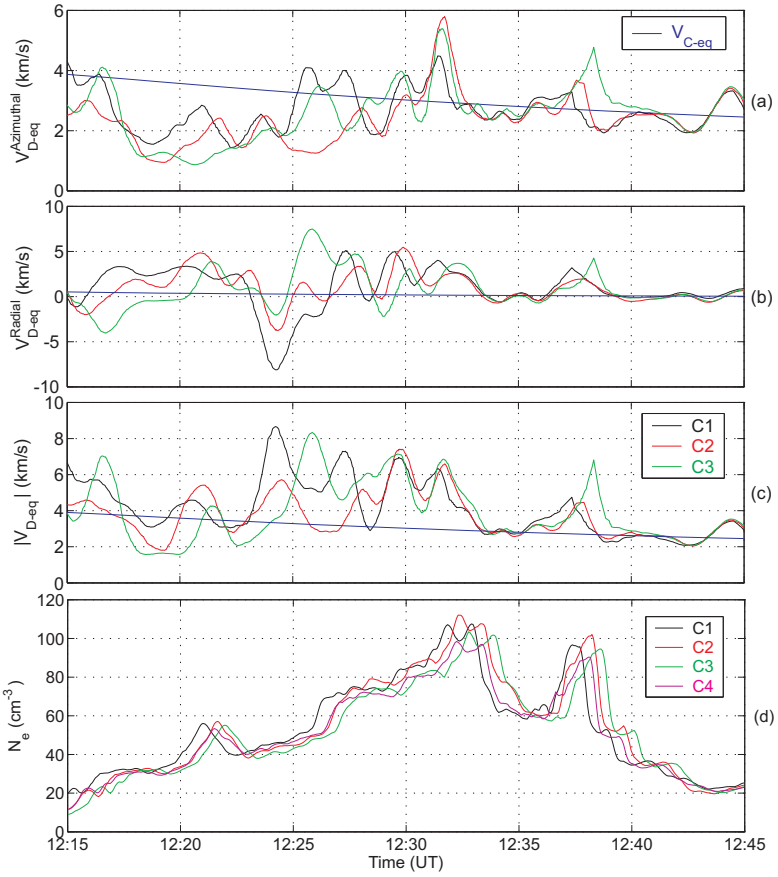

Figure 13.14: *Vitesse de dérive électronique $\boldsymbol{V_{D-eq}}$ mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique, représentée par ses composantes azimutales (a), radiales (b) et sa magnitude (c) en fonction du temps pour les satellites C1, C2 et C3 durant la traversée entrante du panache du 2 Juin 2002, avec la vitesse de co-rotation $\boldsymbol{V_{C-eq}}$ également projetée dans le même plan (lignes bleues). La densité électronique déterminée par WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER est représentée dans le panneau (d).*

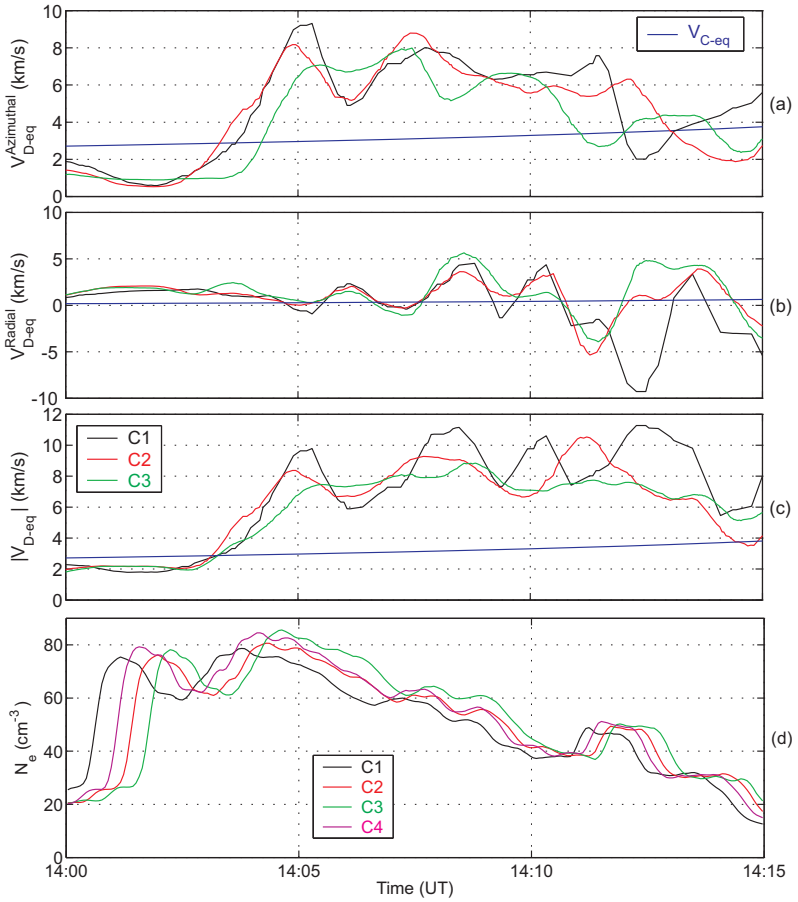

Figure 13.15: *Vitesse de dérive électronique $\boldsymbol{V_{D-eq}}$ mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique, représentée par ses composantes azimutales (a), radiales (b) et sa magnitude (c) en fonction du temps pour les satellites C1, C2 et C3 durant la traversée sortante du panache du 2 Juin 2002, avec la vitesse de co-rotation $\boldsymbol{V_{C-eq}}$ également projetée dans le même plan (lignes bleues). La densité électronique déterminée par WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER est représentée dans le panneau (d).*

secteur de l'après-crépuscule, avec son pied attaché à la plasmasphère situé entre 17:30 et 22:00 MLT. A 17:30 MLT, le panache est situé entre 6.0 et 7.5 R_E, ce qui est cohérent avec WHISPER, qui voit le panache entre 5.5 et 8.5 R_E (mais avec une densité électronique se situant au-dessus du seuil supposé de l'instrument EUV seulement entre 5.7 et 7.8 R_E).

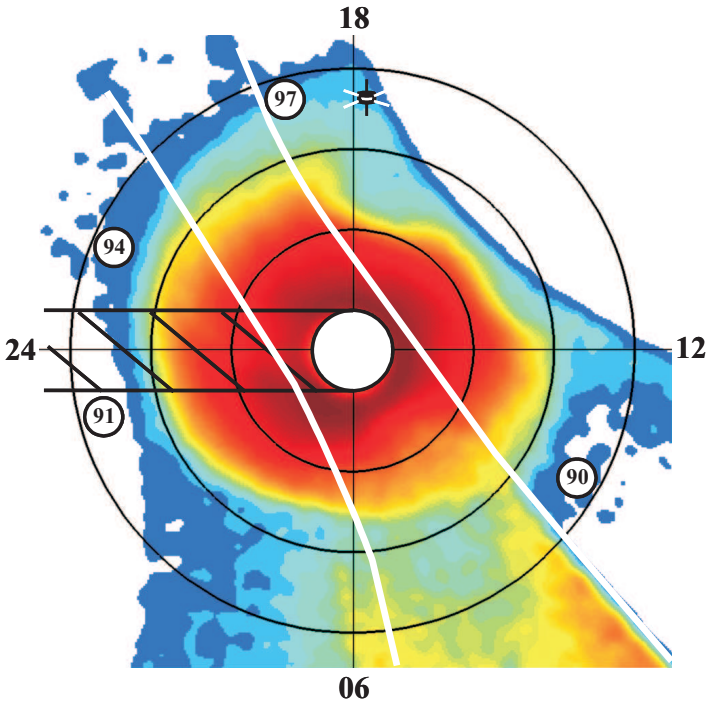

Figure 13.16: *Projection d'une image plein-écran d'EUV dans le plan équatorial magnétique à 12:33 UT le 2 Juin 2002. Le disque blanc au centre de l'image correspond à la taille et position de la Terre, avec son ombre s'étendant à travers la plasmasphère dans la direction anti-solaire. Les trois larges cercles correspondent à R_{equat} = 3, 5 et 7 R_E. Les deux lignes blanches correspondent aux limites entres les trois caméras d'EUV. La position des satellites CLUSTER est indiquée sur l'image EUV, ainsi que la position de quatre satellites géosynchrones: LANL 1990-095, LANL 1991-080, LANL 1994-084 et LANL 97A.*

Le panache est observé sur les images EUV à partir de 10:10 UT jusqu'à 14:30 UT. Ces images successives permettent de déterminer le mouvement du panache. Ainsi, le pied du panache (à 3.7 R_E) se déplace à V_E = 1.6 $\pm$ 0.1 km/s, proche de la vitesse de co-rotation V_{C-eq} = 1.7 km/s. Il n'est pas aisé de faire le même calcul pour l'extrémité du panache car il est difficile d'identifier sans ambiguité cette extrémité. Cependant, celle-ci se déplace clairement moins rapidement que le pied. Par ailleurs, les images EUV montrent que l'extrémité s'éloigne de la Terre. Les mesures de CLUSTER montrent également cet éloignement, avec la zone interne du panache qui se déplace de R_{equat} = 5.6 à 6 R_E entre les traversées entrantes et sortantes.

Pour cet événement, il n'y a qu'un seul satellite géosynchrone (LANL 97A) qui observe une augmentation de la densité ionique jusqu'à 100 cm^{-3} à 19:00 MLT et vers 12:30 UT; les trois autres sont en dehors de ce secteur MLT (voir la position des satellites LANL 1990-095, LANL 1991-080, LANL 1994-084 et LANL 97A sur la Figure 13.16). Le satellite LANL 97A observe

cette large structure de densité durant 10 heures de son orbite autour de la Terre entre 12:00 et 22:00 MLT. Cela est cohérent avec le panache observé par IMAGE entre 17:30 et 22:00 MLT, mais également avec la forte valeur de densité déterminée par CLUSTER (densité électronique maximum de 100 cm^{-3}) et avec la distance équatoriale à laquelle CLUSTER voit ce panache à 12:30 UT: 6.5 R_E.

13.2.3 Simulations numériques

La Figure 13.17 montre la position de la plasmapause dans le plan équatorial magnétique, basée sur une simulation numérique d'instabilité d'interchange, à différentes heures le 2 Juin 2002. Au début de la simulation (c'est-à-dire à 00:30 UT, panneau (a)), la plasmapause est presque circulaire et située vers 4.5 R_E. Suite à l'augmentation de K_p jusqu'à 4 à 00:00 UT, et la diminution simultanée de l'indice Dst (voir les panneaux de gauche), un léger gonflement (B) se forme dans le secteur de l'après-minuit (voir panneau (b)). Cela correspond également à une rotation vers le Sud de l'IMF. Ce gonflement évolue ensuite en une structure ressemblant à un panache (B→P), tournant autour de la Terre à travers tous les secteurs MLT à une vitesse proche de la vitesse de co-rotation (panneaux (c) et (d)). A 12:30 UT, le panache (P) se trouve dans le secteur du crépuscule, entre 17:00 et 18:00 MLT (voir Figure 13.18). C'est le même secteur de temps local que la traversée entrante du panache par CLUSTER (17:40 − 17:50 MLT). A 14:00 UT, le panache simulé est également situé dans le même secteur que le panache observé par CLUSTER (18:00 − 19:00 MLT d'après la simulation, 18:15 − 18:30 MLT d'après CLUSTER).

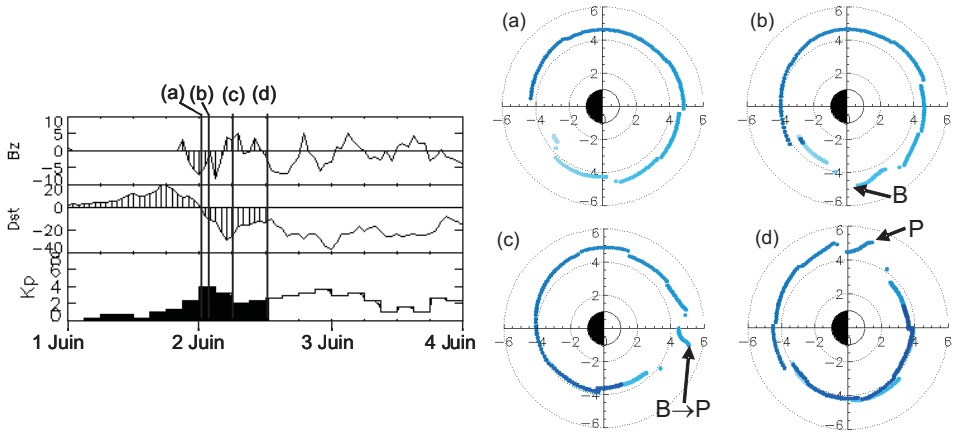

Figure 13.17: *Position prédite de la plasmapause dans le plan équatorial magnétique basée sur une simulation numérique dépendante du modèle empirique de champ électrique de convection E5D et du mécanisme d'interchange. Les panneaux de gauche donnent des indices définissant le vent solaire et l'activité géomagnétique (B_Z, Dst et K_p) durant la période de simulation. Les panneaux de droite indiquent la position de la plasmapause et l'évolution du gonflement (B) en panache (P), (a) à 00:30 UT le 2 Juin 2002, (b) à 02:00 UT le 2 Juin 2002, (c) à 06:00 UT le 2 Juin 2002, (d) à 10:00 UT le 2 Juin 2002.*

En comparant cette simulation avec l'image EUV projetée dans le plan équatorial magnétique à 12:33 UT (Figure 13.16), nous observons, comme dans le premier événement, un décalage dans la position du panache en MLT. Celui-ci peut être la conséquence de l'incertitude de 1.5 heures UT sur l'instant exact du début du sous-orage dans le modèle théorique de champ électrique (E5D) utilisé dans cette simulation. En effet, d'après les images EUV, le panache est situé entre 18:00 et 22:00 MLT, mais entre 17:00 et 18:00 MLT suivant la simulation. Malgré ce décalage d'1 à 3 heures, il y a une assez bonne corrélation entre la position simulée et la position observée de la plasmapause. Dans le secteur du matin (entre 08:00 et 10:00 MLT), la simulation montre une plasmapause vers 4 R_E et les images EUV la placent entre 4 et 4.5 R_E. Dans le secteur de l'après-minuit, elle est située à 4.5 R_E d'après la simulation, et entre 4.5 et 5 R_E suivant les observations EUV.

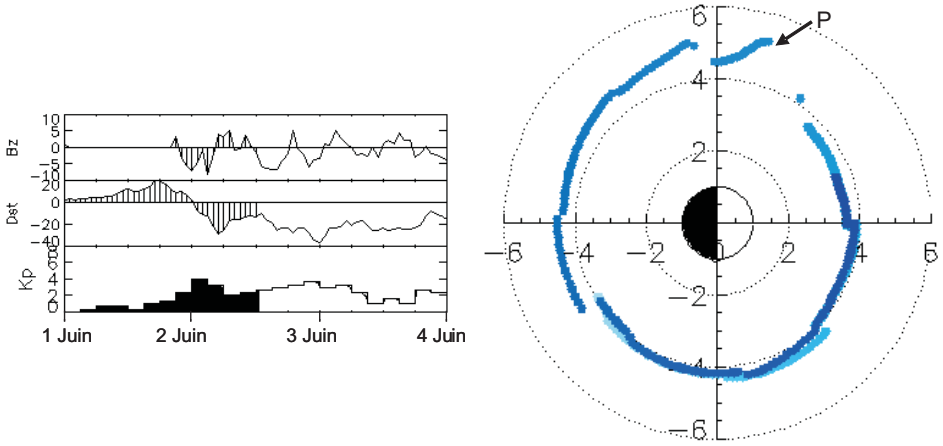

Figure 13.18: *Position prédite de la plasmapause dans le plan équatorial le 2 Juin 2002 à 12:30 UT (similaire à la Figure 13.17).*

Il est intéressant de noter que ce panache disparaît dans la simulation vers 23:00 UT, car l'indice K_p continue à augmenter. Ainsi, la plasmapause se forme plus près de la Terre dans le secteur de l'après-minuit, et le panache, tout comme la couche la plus extérieure de la plasmasphère, est épluchée et convectée vers l'extérieur de la plasmasphère. Sur les images EUV, le panache disparaît également à la fin de cette même journée, et un nouveau panache se forme le jour suivant.

13.3 11 Avril 2002

13.3.1 Observations avec CLUSTER

Ce troisième événement se situe le 11 Avril 2002 dans le secteur de temps local de l'avant-minuit, entre 21:40 et 21:10 MLT, avec une valeur maximum de K_p durant les 24 heures précédentes de 3^-. La distance de séparation entre les satellites CLUSTER est d'environ 150 km. Durant cette traversée, le tétraèdre est relativement alongé, avec une élongation E de l'ordre de

0.8 et une planéité P inférieure à 0.2. Malgré cette configuration non optimale, il est possible d'obtenir un gradient spatial utilisable. La Figure 13.19 représente par une ligne noire pleine l'orbite du satellite C1 durant la traversée, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. Des modèles de la position de la magnétopause et du choc d'étrave, ainsi que des lignes de champ magnétique sont indiqués pour référence.

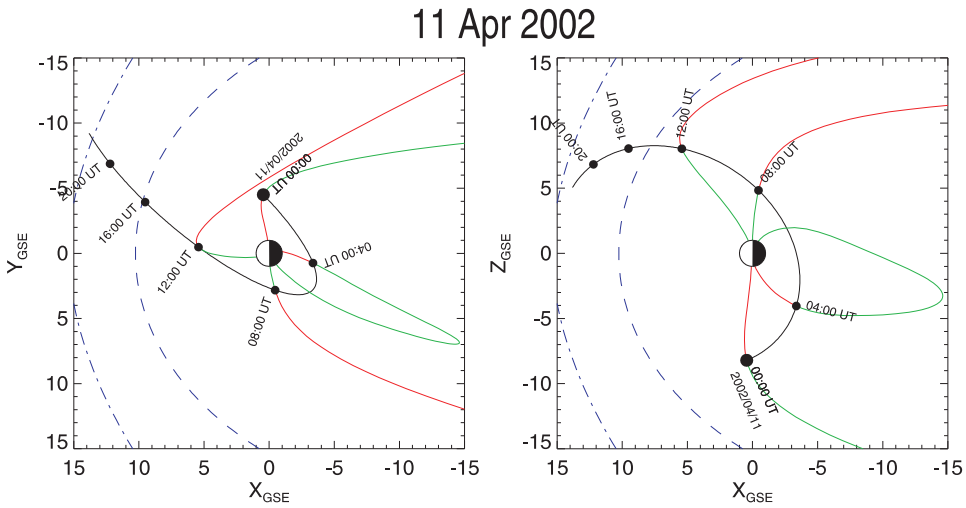

Figure 13.19: *Projection de l'orbite du satellite C1 dans les plans XY et XZ GSE durant la traversée du 11 Avril 2002, avec la position du satellite indiquée toutes les 4 heures. La ligne bleue en pointillé indique la position de la magnétopause, alors que le choc d'étrave est tracé en bleu point-pointillé. Une ligne de champ magnétique a été tracée toutes les 4 heures vers la magnétopause ou vers la Terre: les lignes parallèles au champ magnétique (direction Sud-Nord) sont tracées en vert, alors que les lignes anti-parallèles (direction Nord-Sud) le sont en rouge (D'après le groupe de travail CLUSTER-SOL,* `http://ion.le.ac.uk/~cluster/orbit_plots.html`*).*

La Figure 13.20 montre les quatre spectrogrammes temps-fréquence de WHISPER durant cette traversée de la plasmasphère. Un panache est observé durant les traversées entrantes (IP) et sortantes (OP), mais la taille et la forme de ce panache changent nettement entre les deux passages. On peut également observer de nombreuses irrégularités de densité à l'intérieur de la plasmasphère, irrégularités décrites dans le Chapitre 12.

Les profils de densité électronique (voir Figure 13.21) permettent de calculer les vitesses de frontière normales $\boldsymbol{V_N}$ en utilisant la méthode des délais décrite dans le Chapitre 7. Après projection dans le plan équatorial magnétique (voir la méthode dans l'Annexe C), nous trouvons V_{N-eq} = 2.1 $\pm$ 0.3 km/s et 1.7 $\pm$ 0.3 km/s respectivement pour les côtés externes et internes de la traversée entrante, et V_{N-eq} = 1.4 $\pm$ 0.3 km/s et 1.6 $\pm$ 0.3 km/s respectivement pour les côtés externes et internes de la traversée sortante. Avec $\phi \approx 15 - 20°$ pour les côtés externes et internes des deux traversées, les vitesses azimutales équatoriales sont V_{P-eq} = 8.1 $\pm$ 1.2 km/s et 5.0 $\pm$ 0.8 km/s pour la traversée entrante, et V_{P-eq} = 4.1 $\pm$ 0.9 km/s et 6.2 $\pm$ 1.1 km/s pour la traversée sortante (si la vitesse de convection est seulement azimutale). La vitesse de co-rotation V_{C-eq} varie entre 3.3 et 2.8 km/s durant la traversée entrante et entre 3.1 et 3.6 km/s

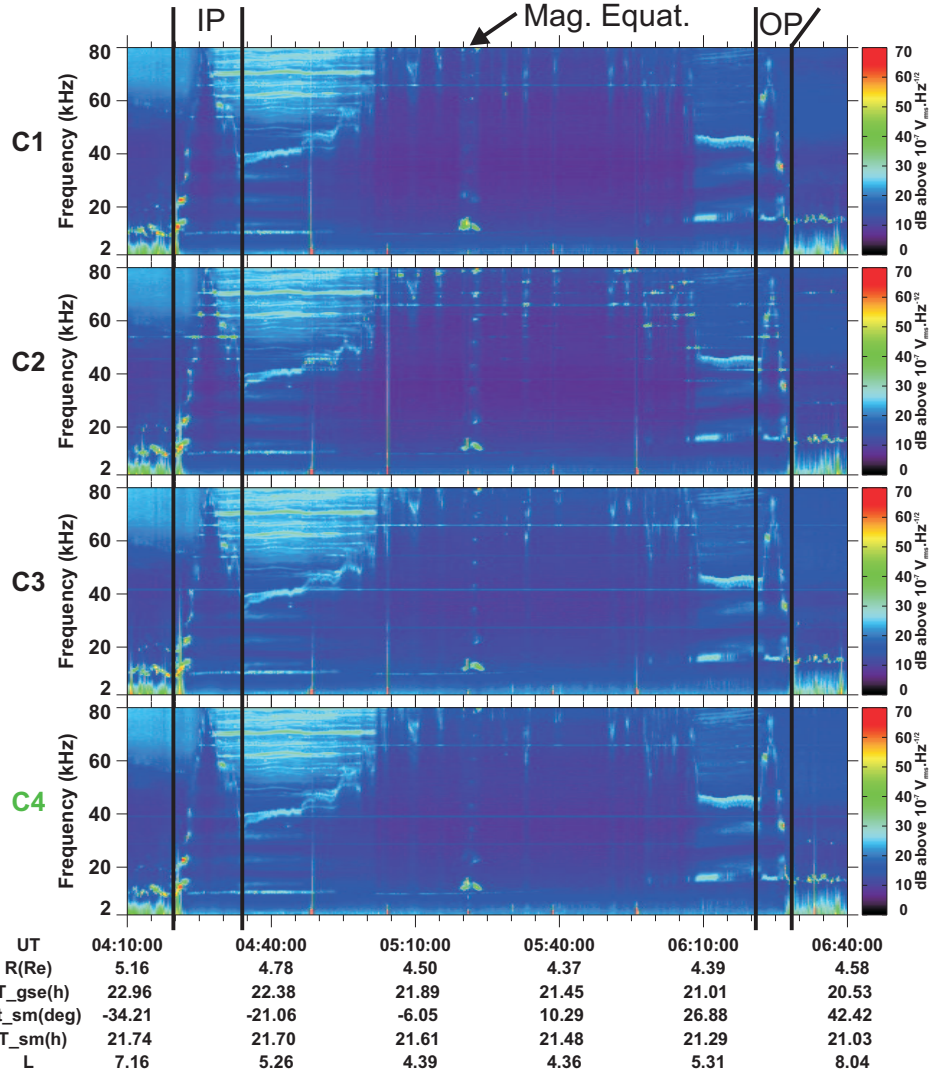

Figure 13.20: *Spectrogrammes temps-fréquence du 11 Avril 2002 entre 04:10 et 06:40 UT déterminés par l'instrument WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER. Toute la traversée de la plasmasphère est montrée, incluant un panache durant la traversée entrante (IP) et durant la traversée sortante (OP), ainsi que l'équateur magnétique (Mag. Equat.). Les paramètres d'orbite sont ceux de C4.*

durant la sortante. Ceci pourrait également être compatible avec une vitesse azimutale plus petite s'il y avait en même temps un mouvement radial du plasma. La détermination de V_{IO-eq} à partir du déplacement d'une structure entre les traversées entrantes et sortantes confirme les calculs précédents: pour le côté interne, V_{IO-eq} = 0.7 $\pm$ 0.1 km/s, alors que V_{R-eq} = 1.7 $\pm$ 0.2 km/s, et pour le côté externe, V_{IO-eq} = 0.4 $\pm$ 0.1 km/s, alors que V_{R-eq} = 1.8 $\pm$ 0.2 km/s. Tous ces résultats montrent que le panache n'est pas totalement en co-rotation, mais se déplace également radialement.

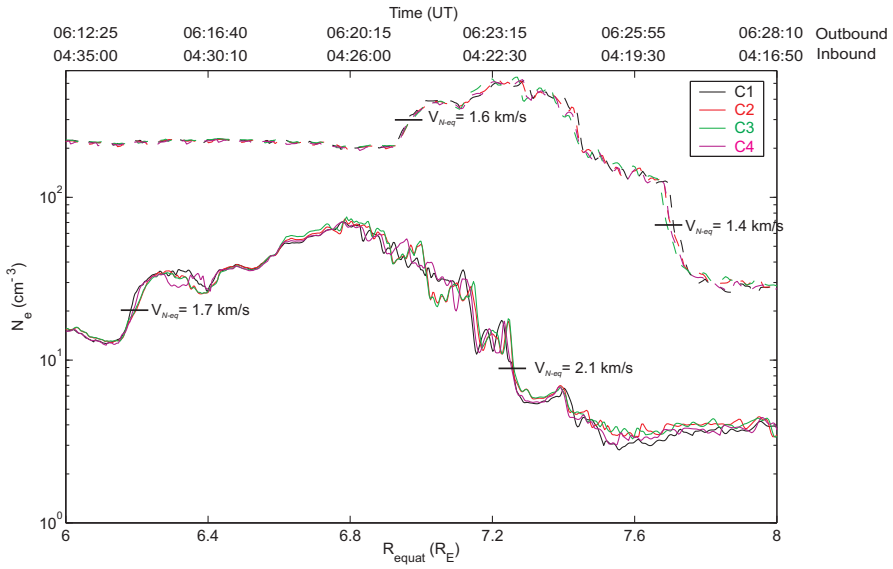

Figure 13.21: *Densité électronique du panache déterminée par les quatre instruments WHISPER pour le 11 Avril 2002 en fonction de R_{equat} et du temps. Les quatre courbes en trait plein dans le bas de la figure correspondent à la densité durant la traversée entrante du panache, alors que celles correspondant à la traversée sortante ont leur densité multipliée par un facteur 10 pour augmenter la clarté de la figure (traits pointillés). La magnitude des vitesses normales de frontière V_{N-eq} dérivées à partir des délais entre les satellites évalués à différents instants, puis projetées dans le plan équatorial, est indiquée sur la figure.*

Les données CIS en mode RPA sont affichées sur la Figure 13.22 pour les satellites C1 et C3, avec le même type de figure que la Figure 13.13. Le panache plasmasphérique est clairement détecté par les deux satellites durant la traversée entrante vers 04:30 UT (IP), et autour de 06:20 UT pour la traversée sortante (OP). La composition ionique est différente entre le panache et l'intérieur de la plasmasphère (PLS): il y a moins d'ions He^+ dans le panache (panneaux (b) et (d)), comme dans les deux événements précédents. L'extension du panache le long de la trajectoire des satellites est similaire à celle observée par l'instrument WHISPER. En particulier, on observe deux pics de densité durant la traversée entrante du panache, comme avec WHISPER. La densité déterminée avec CIS est à nouveau inférieure à celle déduite avec WHISPER (panneau (e)), en raison du potentiel du satellite et du domaine d'énergie limité de l'instrument CIS en mode RPA (seuil $\approx$ 1 eV). A l'intérieur de la plasmasphère, la vitesse des ions H^+ projetée dans le plan équatorial $\boldsymbol{V_{H-eq}}$ est dans la direction de co-rotation. Durant la traversée entrante

du panache, $\boldsymbol{V_{H-eq}}$ est essentiellement azimuthal, mais également légèrement vers l'extérieur. Par contre, le panache sortant possède une vitesse $\boldsymbol{V_{H-eq}}$ dirigée vers l'extérieur, mais avec des valeurs inférieures à celles du panache entrant. Ceci est cohérent avec les vitesses déterminées par WHISPER (plus grandes durant la traversée entrante que sortante): cela indique à nouveau un léger déplacement radial du panache vers l'extérieur.

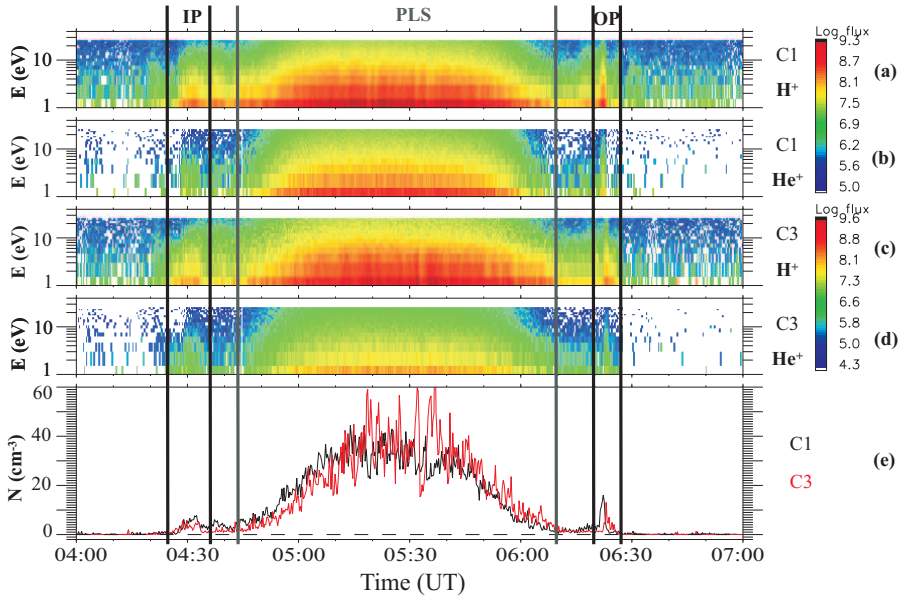

Figure 13.22: *Spectrogrammes temps-énergie de l'instrument CIS en mode RPA durant toute la traversée de la plasmasphère du 11 Avril 2002 pour C1 et C3. Les panneaux (a) et (b) donnent la distrivution des ions H^+ et He^+ pour C1, alors que les mêmes données pour C3 sont indiquées sur les panneaux (c) et (d). Le panneau (e) fournit la densité des ions H^+ pour C1 (noir) et C3 (rouge).*

Les vitesses de dérive mesurées par EDI à bord de C1, C2 et C3 durant cette traversée de plasmasphère et projetées dans le plan équatorial sont affichées sur la Figure 13.23. A l'intérieur de la plasmasphère, la vitesse de dérive moyenne projetée dans le plan équatorial V_{D-eq} = 2.4 $\pm$ 0.2 km/s est proche de la vitesse de co-rotation V_{C-eq} = 2.0 - 2.5 km/s dans cette région (4.5 $-$ 4.3 R_E). Cette vitesse s'écarte de V_{C-eq} à mesure que les satellites s'éloignent de l'équateur, ce qui est attendu lorsque les satellites sont dans les couches les plus extérieures de la plasmasphère. Le comportement est différent entre les deux traversées du panache: durant la traversée entrante, la vitesse de dérive est à nouveau dans la direction de co-rotation avec V_{D-eq} = 4.4 $\pm$ 1.0 km/s, proche de la valeur de la vitesse de co-rotation à cet endroit (V_{C-eq} = 2.8 $-$ 3.3 km/s). Cependant, durant la traversée sortante, la vitesse de dérive possède une plus forte composante radiale (1 km/s) et une magnitude plus basse (V_{D-eq} = 2.0 $\pm$ 1.0 km/s), excepté dans la partie du panache avec la densité maximale (d'après les mesures de WHISPER), où $\boldsymbol{V_{D-eq}}$ est dans la direction de co-rotation. Cela est cohérent avec les vitesses déterminées par WHISPER, plus grandes durant la traversée entrante que durant la sortante. Cela indique également un léger déplacement radial du panache vers l'extérieur.

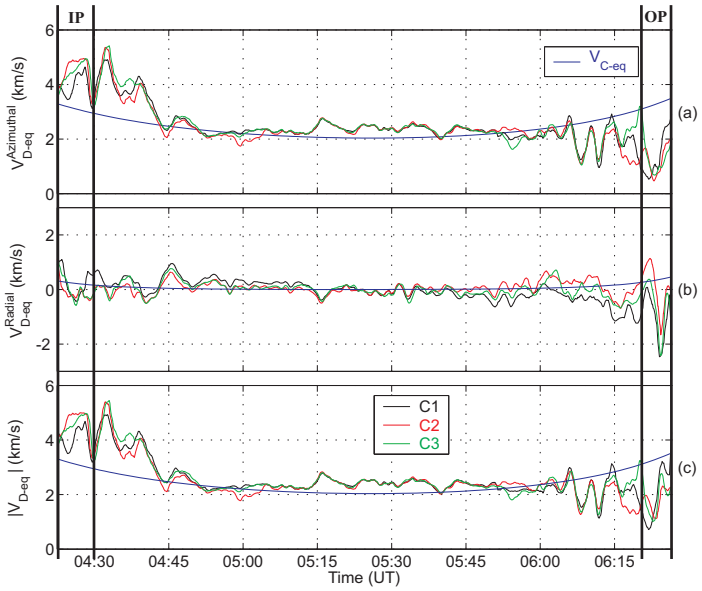

Figure 13.23: *Vitesse de dérive électronique $\boldsymbol{V_{D-eq}}$ mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique, représentée par ses composantes azimutales (a), radiales (b) et sa magnitude (c) en fonction du temps pour les satellites C1, C2 et C3 durant la traversée de la plasmasphère du 11 Avril 2002 incluant le panache entrant (IP) et le panache sortant (OP), avec la vitesse de co-rotation $\boldsymbol{V_{C-eq}}$ également projetée dans le même plan (lignes bleues).*

Pour les deux traversées du panache plasmasphérique, nous n'observons pas de variations dans l'orientation du champ magnétique $\boldsymbol{V_B}$ (voir le champ magnétique mesuré et celui provenant de modèles sur les Figures 13.24b-e et 13.25b-e). Par contre, il y a des variations significatives de $\boldsymbol{V_B}$ juste à l'extérieur du panache. Dans ces régions, le calcul de la densité de courant électrique J n'est pas possible avec cette méthode multipoint, en raison des variations trop brutales des composantes du champ magnétique qui brisent la condition d'homogénéité et empêchent ainsi le calcul des gradients spatiaux de ces composantes. Par contre, en dehors de ces régions, J est faible, de l'ordre de 20 nA/m^2 pour le panache entrant et de 50 nA/m^2 pour le panache sortant.

13.3.2 Observations avec IMAGE et LANL

Les observations EUV effectuées aux instants de traversée du panache plasmasphérique par CLUSTER sont affichées sur la Figure 13.26. Ces images plein-écran d'EUV, projetées sur le plan équatorial du dipôle magnétique, suggèrent que le panache analysé ici s'étend du secteur de temps local de l'après-minuit jusqu'à l'avant-minuit. Le panache observé à 04:31 UT et 21:40 MLT s'étend de 6.4 à 7.1 R_E d'après les images EUV, et de 6.2 à 7.2 R_E d'après WHISPER (un peu plus large dans ce cas, car l'instrument WHISPER est sensible à de plus faibles densités). A 06:14 UT et 21:10 MLT, EUV donne une taille transversale d'environ 0.5 R_E, alors qu'à 06:24 UT, WHISPER donne une valeur de 0.7 R_E. Par ailleurs, la forme générale

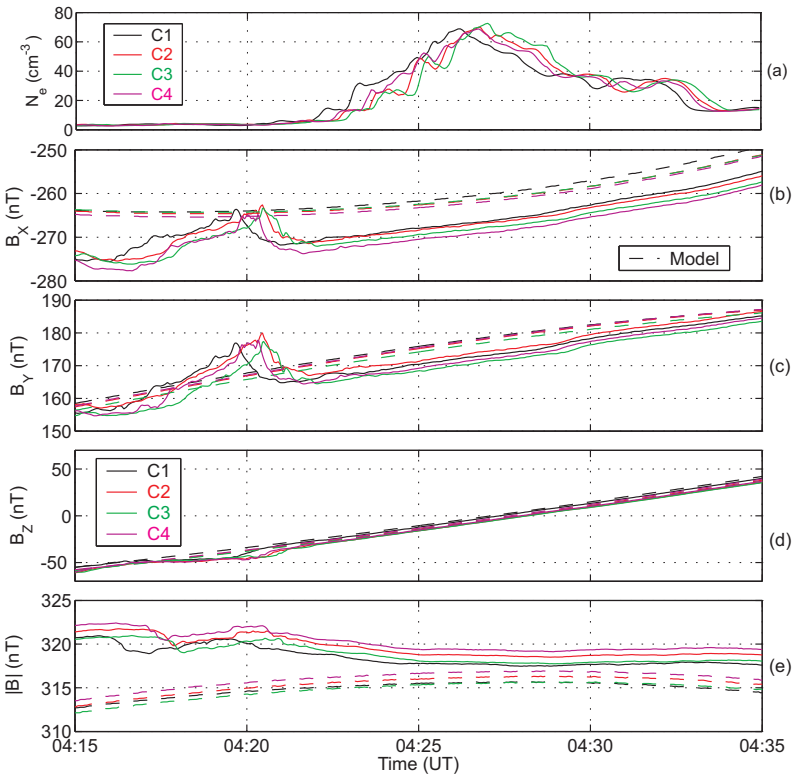

Figure 13.24: *Différentes quantités représentées en fonction du temps durant la traverséee entrante du panache le 11 Avril 2002: (a) densité électronique déterminée par WHISPER; (b)-(e) composantes et magnitude en GSE du champ magnétique mesuré par FGM (lignes pleines) et du champ déterminé à partir des modèles IGRF2000 et Tsyganenko-96 (lignes pointillées).*

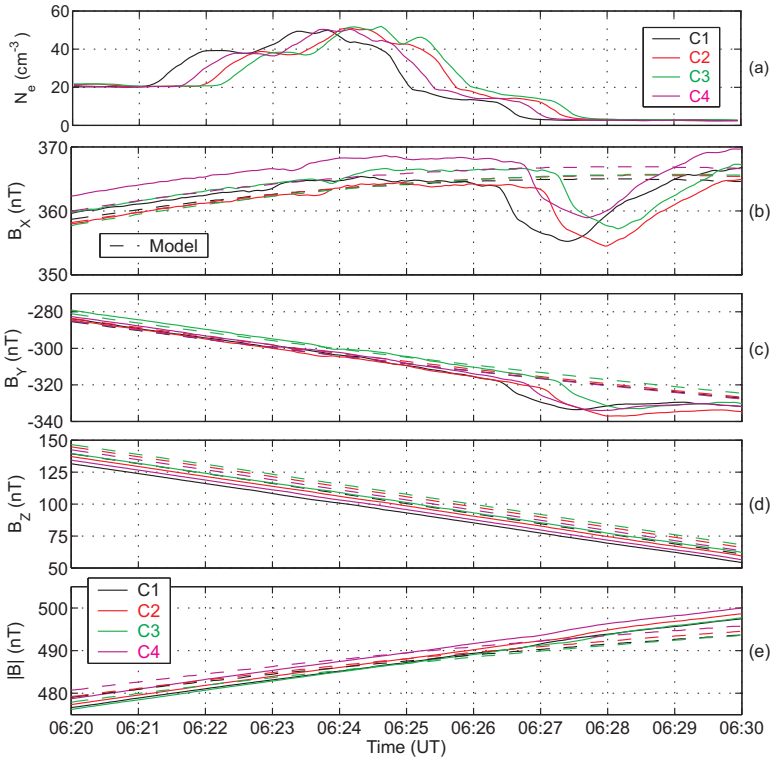

Figure 13.25: *Différentes quantités représentées en fonction du temps durant la traverséee sortante du panache le 11 Avril 2002: (a) densité électronique déterminée par WHISPER; (b)-(e) composantes et magnitude en GSE du champ magnétique mesuré par FGM (lignes pleines) et du champ déterminé à partir des modèles IGRF2000 et Tsyganenko-96 (lignes pointillées).*

du panache dérivée des images EUV est cohérente avec les directions normales de frontières déterminées par WHISPER. Tout ceci montre l'accord entre les observations globales d'EUV et les observations in situ de WHISPER.

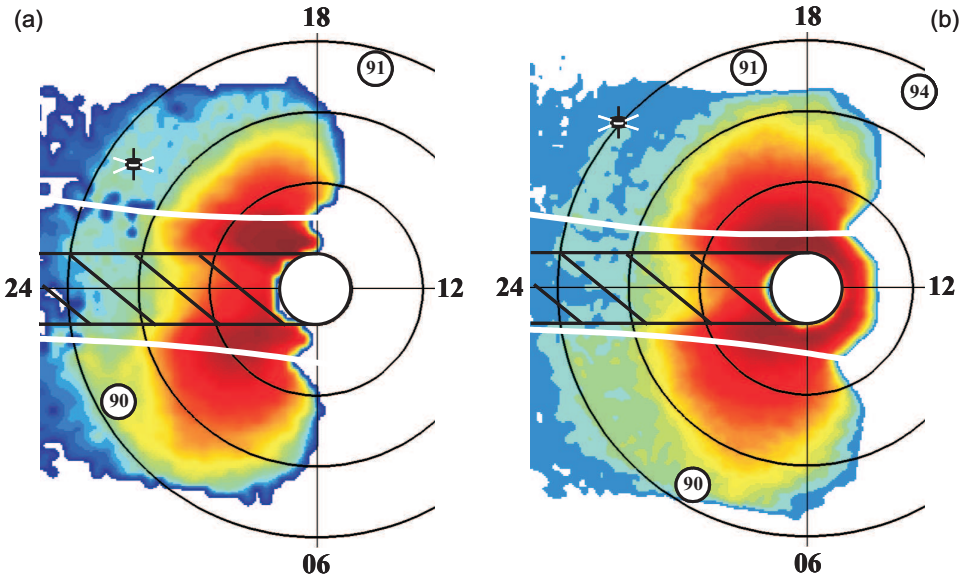

Figure 13.26: *Projection de deux images plein-écran EUV dans le plan équatorial magnétique à (a) 04:31 UT et (b) 06:14 UT le 11 Avril 2002. Le disque blanc au centre de l'image correspond à la taille et position de la Terre, avec son ombre s'étendant à travers la plasmasphère dans la direction anti-solaire. Les trois larges cercles correspondent à* R_{equat} *= 3, 5 et 7* R_E*. Les deux lignes blanches correspondent aux limites entres les trois caméras d'EUV. La position des satellites CLUSTER est indiquée sur l'image EUV, ainsi que la position de trois satellites géosynchrones: LANL 1990-095, LANL 1991-080 et LANL 1994-084.*

Le panache est vu pour la première fois dans les images EUV vers 01:30 UT, avec son pied attaché à la plasmasphère vers 00:00 MLT (étant dans l'ombre de la Terre, il est difficile de le situer plus précisément). Il est visible jusqu'à 08:00 UT, avec son pied situé vers 06:00 MLT. Cela nous donne une valeur approximative du déplacement du pied du panache (à 5.5 R_E) de V_E = 2.3 $\pm$ 0.1 km/s, légèrement inférieur à la vitesse de co-rotation V_{C-eq} = 2.5 km/s. Bien que l'extrémité du panache soit pratiquement en dehors du champ de vision de l'instrument EUV, des images successives nous montrent que cette extrémité se déplace à une vitesse de l'ordre de la moitié de la vitesse de co-rotation. Il y a également un léger déplacement radial de 0.2 R_E vers l'extérieur entre 04:30 et 06:15 UT, mais ce mouvement semble s'arrêter par après.

Durant cette traversée de plasmasphère, les satellites géosynchrones LANL qui sont disponibles ne se trouvent pas dans les secteurs MLT où CLUSTER et IMAGE observent un panache plasmasphérique, c'est-à-dire dans le secteur avant-minuit (voir la position de LANL 1990-095, LANL 1991-080 et LANL 1994-084 sur la Figure 13.26). Une légère augmentation de la densité ionique jusqu'à 20 cm^{-3} est observée par LANL 1994-084 vers 20:00 MLT quelques heures après la traversée de CLUSTER, entre 09:00 et 10:00 UT; cela pourrait être l'extrémité du panache.

13.3.3 Simulations numériques

Pour cet événement, la simulation numérique basée sur la mécanisme d'interchange ne crée pas de grand panache plasmasphérique, contrairement aux observations. En effet, la valeur maximum du K_p dans les 24 heures précédentes est de 3^-, et il n'y a qu'une petite augmentation de cet indice géomagnétique durant cette période (entre 1^+ et 3^-). Cela semble, d'après l'ensemble de nos études et d'après Pierrard et Lemaire [2004], être une variation trop faible pour pouvoir créer un panache avec cette version de la simulation. En effet, celle-ci ne résoud pas les changements dynamiques de la forme de la plasmapause qui ont lieu à l'intérieur d'une période de 3 heures, durant laquelle l'indice K_p est présumé constant. Par conséquent, une petite structure seulement, apparaît dans la simulation, comme on peut le voir sur la Figure 13.27. Cette structure a été créée suite à l'augmentation de K_p jusqu'à 3^-, puis a été en co-rotation autour de la Terre. Elle est observée à 06:30 UT vers 21:00 MLT, proche du secteur de temps local où IMAGE et CLUSTER observent le panache.

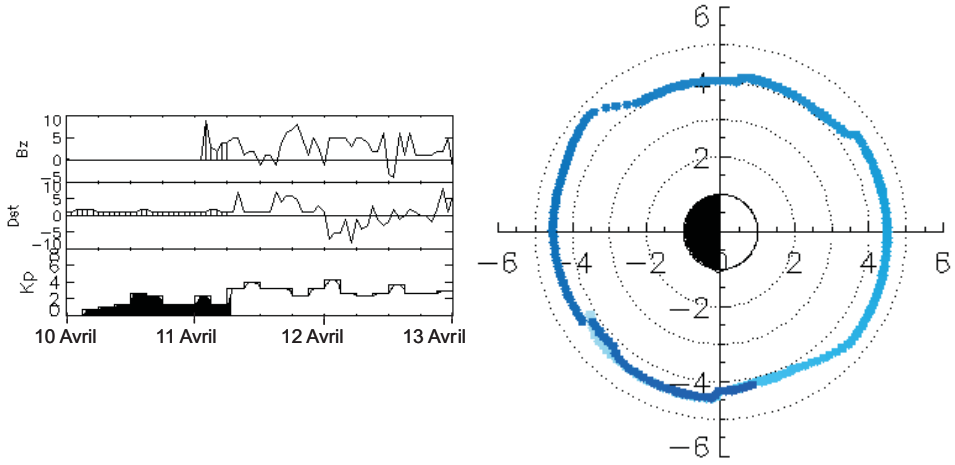

Figure 13.27: *Position prédite de la plasmapause dans le plan équatorial basée sur une simulation numérique dépendante du modèle empirique de champ électrique de convection E5D et du mécanisme d'interchange. Les panneaux de gauche donnent des indices définissant le vent solaire et l'activité géomagnétique (B_Z, Dst et K_p) durant la période de simulation. Les panneaux de droite indiquent la position de la plasmapause et du panache à 06:30 UT le 11 Avril 2002.*

Concernant la position de la plasmapause, la comparaison entre la simulation et EUV donne une assez bonne correspondance dans les régions où les images EUV ne sont pas corrompus par des reflections internes dans les caméras ou par l'ombre de la Terre. En effet, à 06:30 UT et entre 01:00 et 05:00 MLT, EUV donne une plasmapause vers 5 R_E, alors que la plasmapause simulée se situe vers 4.5 R_E. Dans le secteur de l'avant-minuit (18:00 − 21:00 MLT), la plasmapause est autour de 4.5 R_E d'après EUV, 5 R_E d'après WHISPER et 4 R_E suivant la simulation. Le faible accord est probablement dû au fait que durant cette période de temps particulière, le modèle de champ électrique moyen de convection E5D n'était pas assez satisfaisant pour cette distribution de champ électrique, alors qu'il semblait l'être pour les deux événements

Table 13.1: *Comparaison entre WHISPER et EUV concernant la distance radiale à l'équateur en R_E du panache.*

Distance Radiale à l'Equateur du Panache (R_E)

Jour	Heure	MLT	WHISPER	EUV
7 Mai 2002	08:30 UT	20:00 MLT	7.3 → 8.2	7.0 → 7.7
2 Juin 2002	12:30 UT	17:45 MLT	5.5 → 8.5	6.0 → 7.5
11 Avril 2002	04:30 UT	21:40 MLT	6.2 → 7.2	6.4 → 7.1
11 Avril 2002	06:20 UT	21:10 MLT	6.9 → 7.6	6.6 → 7.1

précédents. En particulier, ce modèle est un modèle de champ électrique quasi-statique, dont les limites ont été relevées par Lemaire et Gringauz [1998], p. 301 et par Pierrard et Lemaire [2004].

Il est intéressant de noter que quelques heures après cette traversée de plasmasphère par CLUSTER, l'indice K_p augmente jusqu'à 4; et c'est à cet instant qu'un plus grand panache est créé. Mais, comme les satellites CLUSTER ne croisent la plasmasphère que 57 heures plus tard, ils ne peuvent pas voir ce panache, qui a eu le temps de disparaître entre temps. Cependant, on peut voir ce second panache se développer dans les images EUV vers 21:00 UT dans le secteur du crépuscule, comme prédit par la simulation. Cela indique que, pour produire dans le secteur de l'aurore un renflement, qui pourrait se transformer ensuite en panache, il est nécessaire d'avoir un sous-orage capable de produire une augmentation significative et suffisamment brutale de l'indice K_p (c'est-à-dire $\Delta K_p > 2$).

13.4 Conclusions

Trois traversées de plasmasphère ont été analysées afin de comparer des observations de panaches plasmasphériques à l'aide de différents jeux de données: les observations in situ de CLUSTER, celles des satellites LANL, les images globales d'IMAGE et des simulations numériques.

Les trois événements montrent différentes caractéristiques concernant les panaches, et les comparaison entre les mesures in situ de CLUSTER et la vue globale d'IMAGE donnent des résultats cohérents concernant la position et la taille des panaches (voir un résumé de ces résultats dans les Tableaux 13.1 et 13.2).

Certains panaches sont très longs et s'étendent à travers un large secteur MLT (jusqu'à 4:30 heures MLT), leur taille transversale va de 0.5 à 1.5 R_E, et leur position radiale varie de 5.5 à 8.5 R_E. Les positions de la plasmapause déterminées par WHISPER et par EUV sont cohérentes entre elles et avec les résultats prédits par les simulations numériques utilisées dans cette étude (Tableau 13.3).

Le déplacement des panaches a été étudié à l'aide de différentes vitesses déterminées par différentes méthodes ou instruments: la vitesse normale de frontière et la vitesse radiale apparente déterminées par l'instrument WHISPER à bord de CLUSTER, la vitesse de dérive des électrons mesurée par EDI, la vitesse des protons calculée par CIS, la vitesse azimuthale et radiale dé-

Table 13.2: *Comparaison entre WHISPER, EUV et les simulations numériques concernant la position en MLT du panache.*

Position du Panache (MLT)

Jour	Heure	WHISPER	EUV	Simulations Numériques
7 Mai 2002	08:30 UT	20:00	20:00 → 01:00	22:00 → 23:30
2 Juin 2002	12:30 UT	17:45	17:30 → 22:00	17:00 → 18:00
11 Avril 2002	04:30 UT	21:40	20:00 → 03:00	20:00 → 19:00
11 Avril 2002	06:20 UT	21:10	21:00 → 04:00	21:00 → 20:00

Table 13.3: *Comparaison entre WHISPER, EUV et les simulations numériques concernant la position de la plasmapause.*

Position de la Plasmapause (R_E)

Jour	Heure	MLT	WHISPER	EUV	Simulations Numériques
7 Mai 2002	08:30 UT	18:00 – 20:00 MLT	< 4.2	$3.7 - 4.0$	$3.5 - 4.0$
2 Juin 2002	12:30 UT	08:00 – 10:00 MLT	No Data	$4.0 - 4.5$	4.0
11 Avril 2002	06:30 UT	18:00 – 21:00 MLT	5.0	4.5	4.0

duite de l'imageur EUV à bord d'IMAGE. Ces vitesses et leurs définitions sont résumées dans le Tableau 13.4.

Les analyses de vitesse des panaches donnent des résultats cohérents avec les différentes techniques et jeux de données. Ces résultats sont résumés dans les Tableaux 13.5 et 13.6. La conclusion principale est que les panaches tournent autour de la Terre, avec leur pied attaché à la plasmasphère en co-rotation complète, mais avec leur extrémité tournant plus lentement et se déplaçant également vers l'extérieur, en s'éloigant de la Terre. Les résultats concernant les directions normales de frontière sont également cohérents entre eux (voir Tableau 13.5). La différence d'environ 180 °, entre les deux estimations pour les côtés externes de chaque traversée de panache, provient du fait que le gradient de densité est toujours dans le sens des plus grandes valeurs, donc vers l'intérieur du panache depuis le côté externe, alors que la méthode des délais donne une normale dans la direction de la vitesse normale, donc vers l'extérieur du panache depuis ce même côté.

Table 13.4: *Résumé des différents types de vitesse utilisées dans l'analyse des panaches plasmasphériques.*

Vitesses Mesurées

Acronyme (Instrument)	V_D (EDI)	V_E (EUV)	V_C
Nom	Vitesse de dérive électronique	Vitesse azimutale et radiale	Vitesse de co-rotation

Vitesses Calculées

Acronyme (Instrument)	V_N (WHISPER)	V_P (WHISPER)	V_R (WHISPER)	V_{IO} (WHISPER)
Nom	Vitesse normale de frontière	Vitesse azimutale de plasma	Vitesse radiale de frontière apparente	Vitesse radiale moyenne entre une structure entrante et sortante
Hypothèse	Même structure traversée au même instant par les quatre satellites	Mouvement azimutal uniquement	Mouvement azimutal uniquement	Même secteur MLT entre les deux traversées de la même structure

Table 13.5: *Directions normales (°) déterminées à l'aide de deux méthodes différentes (gradient spatial et méthode des délais) et vitesses normales de frontières (km/s), toutes calculées à partir de WHISPER puis projetées dans le plan équatorial magnétique.*

Directions Normales (°) et Vitesses Normales de Frontières (km/s)

Date MLT	Direction Normale (Gradient Spatial)	Direction Normale (Méthode des Délais)	Vitesse Normale de Frontière V_{N-eq} (Méthode des Délais)
7 Mai 2002 20:00 MLT	Côté Externe: 180	08:35 UT: 15	2.3 ± 0.5
Panache Entrant	Côté Interne: 330	08:38 UT: 30	3.6 ± 0.5
2 Juin 2002 17:45 MLT	Côté Externe: 190	12:25 UT: 10	1.2 ± 0.7
Panache Entrant	Côté Interne: 340	12:25 UT: 10	0.7 ± 0.2
2 Juin 2002 18:30 MLT	Côté Externe: 190	08:35 UT: 30	4.2 ± 0.8
Panache Sortant	Côté Interne: 40	12:32 UT: 30	1.1 ± 0.3
11 Avril 2002 21:40 MLT	Côté Externe: 190	08:35 UT: 15	2.1 ± 0.3
Panache Entrant	Côté Interne: 10	08:38 UT: 20	1.7 ± 0.3
11 Avril 2002 21:10 MLT	Côté Externe: 190	08:35 UT: 20	1.4 ± 0.3
Panache Sortant	Côté Interne: 10	08:38 UT: 15	1.6 ± 0.3

Table 13.6: *Comparaison entre les vitesses de dérive électronique mesurées par EDI puis projetées dans le plan équatorial magnétique avec les vitesses de co-rotation également projetées dans le même plan.*

Vitesses Projetées (km/s)

Date	MLT	V_{D-eq} (EDI)	V_{C-eq}
7 Mai 2002	20:00 MLT	Azimutale + Radiale	Azimutale
Panache Entrant		Côté Externe: 8.5 ± 1.0	$3.8 - 3.4$
		Côté Interne: 6.8 ± 1.0	$3.4 - 3.2$
2 Juin 2002	17:45 MLT	Azimutale + Radiale	Azimutale
Panache Entrant		Côté Externe: 4.3 ± 1.0	$3.6 - 2.8$
		Côté Interne: 2.8 ± 1.0	$2.8 - 2.4$
2 Juin 2002	18:30 MLT	Azimutale	Azimutale
Panache Sortant		Côté Externe: 7.8 ± 1.0	$2.9 - 3.6$
		Côté Interne: 3.0 ± 1.0	$2.7 - 2.9$
11 Avril 2002	21:40 MLT	Azimutale	Azimutale
Panache Entrant		Côté Externe: 4.4 ± 1.0	$3.3 - 3.0$
		Côté Interne: 4.4 ± 1.0	$3.0 - 2.8$
11 Avril 2002	21:10 MLT	Azimutale + Radiale	Azimutale
Panache Sortant		Côté Externe: 2.4 ± 1.0	$3.3 - 3.6$
		Côté Interne: 1.7 ± 1.0	$3.1 - 3.3$

Conclusions Générales

Dans cette thèse, nous avons analysé la magnétosphère terrestre en utilisant les nouvelles possibilités qu'offre la mission multi-satellites CLUSTER. Ces conclusions générales sont divisées en deux parties: la première présente les conclusions sur les outils d'analyse, et la seconde les résultats obtenus dans la plasmasphère.

1 Outils d'analyse

L'intérêt principal de la mission CLUSTER est son côté multi-satellites. Cela permet d'étudier les caractéristiques spatiales et temporelles du plasma magnétosphérique à petite et grande échelle. Pour cela, nous avons utilisé différents outils d'analyse multipoints, dont l'utilisation dépend des possibilités de corrélation entre les différents satellites.

1.1 Gradient spatial

Dans le cas d'une bonne corrélation spatiale (cas où la distance de séparation entre les satellites CLUSTER est inférieure à la taille caractéristique de la structure analysée), il est possible d'utiliser une technique d'analyse à quatre points: la détermination des trois composantes du gradient spatial d'une quantité physique scalaire. Cependant cet outil doit être utilisé avec précautions, car il dépend beaucoup de la bonne calibration des données. C'est pourquoi, nous l'avons appliqué dans cette thèse aux données de densité déterminées par WHISPER, dont la calibritaion est absolue, mais également aux mesures du champ magnétique effectuées par FGM. Des tests sur des données synthétiques nous ont permis de donner les limitations de cet outil, et d'en déduire une estimation de l'erreur globale. Nous avons appliqué cette méthode à la traversée d'une structure ondulatoire observée dans la magnétogaine, ce qui nous a permis d'en déduire la direction de propagation du front d'onde. Différents exemples de traversées de magnétopause ont également été présentés. Nous avons ainsi pu évaluer l'orientation d'une magnétopause, ainsi que son déplacement dans sa direction de sa normale. Nous avons également pu reconstruire le profil d'une magnétopause en mouvement en fonction de la distance du satellite dans la direction normale à la frontière, et étudier des éléments de plasma détachés de la magnétopause.

1.2 Méthodes des délais

Par ailleurs, dans le cas d'une bonne corrélation temporelle (cas où l'intervalle de temps entre les satellites est inférieur au temps caractéristique de la structure analysée), la vitesse, dans sa direction normale, d'une frontière supposée plane peut être déterminée à partir des différences de temps de traversée de cette frontière par les quatre satellites et de leurs positions respectives. Une traversée multiple d'une magnétopause a été analysée, et les résultats obtenus avec cette méthode sont en bon accord avec ceux déduits de la détermination du gradient spatial. Une des traversées de cette couche frontière change notamment de direction entre l'entrée et la sortie, ce qui laisse à penser que la magnétosphère, du côté jour, subit un mouvement d'expansion puis de contraction durant l'intervalle de temps considéré.

1.3 Analyse statistique

En ce qui concerne l'analyse statistique à grande échelle, la présence de quatre satellites permet d'obtenir un meilleur échantillonnage d'une région et des conditions géophysiques don-

nées, notamment dans le cas de grandes distances de séparation entre les satellites, mais elle n'offre pas d'information supplémentaire déterminante. En guise d'exemple, nous avons effectué une étude statistique des ondes VLF dans les zones aurorales à partir de mesures effectuées à bord du satellite Viking [Darrouzet et al., 2003]. Nous avons trouvé que les ondes ont une énergie plus importante à basse fréquence ($10 - 19\ kHz$) et à relativement basse altitude ($1500 - 5500\ km$). Les ondes VLF les moins intenses apparaissent dans le secteur MLT entre 09:00 et 15:00. De telles études ont pour but final de créer un modèle des ondes ELF et VLF dans la magnétosphère terrestre, comme il en existe déjà pour les particules de haute énergie ou pour le champ magnétique. Cette étude pourra être complétée par l'analyse des ondes mesurées par les instruments WHISPER et STAFF à bord des satellites CLUSTER. Cette étude a récemment débuté, et sera poursuivie dans les prochaines années.

2 Plasmasphère

Nous avons étudié en détail une région particulière de la magnétosphère, la plasmasphère, dont l'intérêt est grandissant grâce à deux missions scientifiques récentes: CLUSTER et IMAGE. Globalement, la plasmasphère s'est avérée être beaucoup plus complexe et dynamique que supposée précédemment.

2.1 Structure à grande échelle

Nous avons effectué une analyse statistique concernant la frontière extérieure de la plasmasphère, la plasmapause. Nous avons obtenu des résultats conformes aux études précédentes en terme de position et d'épaisseur; par exemple, la plasmapause se forme plus près de la Terre et son épaisseur diminue lorsque le niveau d'activité géomagnétique augmente.

La première étude systématique du gradient spatial appliqué dans la plasmasphère aux données de la mission CLUSTER, densité et champ magnétique, a également été effectuée [Darrouzet et al., 2006b]. Elle a permis d'obtenir une vue plus complète de la géométrie de la plasmasphère extérieure, et notamment d'évaluer l'importance relative entre les deux effets influençant les gradients spatiaux dans la plasmaphère: l'augmentation de la densité et de la magnitude du champ magnétique le long des lignes de champ en s'éloignant de l'équateur magnétique, et la diminution de ces deux quantités à mesure qu'on s'éloigne de la Terre.

Les variations de la magnitude du champ magnétique le long des lignes de champ sont relativement rapides: la magnitude possède un gradient perpendiculaire aux lignes de champ magnétique plus important que le gradient parallèle (excepté près de l'équateur magnétique). Quant à la structure globale de densité, elle est principalement alignée avec le champ magnétique à ces latitudes magnétiques ($\pm\ 30^{\circ}$), mais avec des structures de densité transversales prononcées. Les variations de densité sont plus prononcées au travers des lignes de champ que le long de celles-ci, ce qui produit des gradients perpendiculaires plus importants que les gradients parallèles. A partir d'une étude faite avec IMAGE, Reinisch et al. [2001] ont également trouvé que la densité ne variait pas beaucoup le long des lignes de champ à basse latitude magnétique. La présence de gradients de densité transversaux rend difficile l'évaluation de l'effet

de l'angle d'inclinaison du champ magnétique sur la distribution de densité. Dans tous les cas, il n'y a pas d'évidence de forts gradients de densité le long des lignes de champ, ce que l'on pourrait attendre lors de chocs se propageant le long des lignes de champ magnétique. Ceci est en désaccord avec les modèles magnétohydrodynamiques, qui prédisent que ce type de structures se propagent à partir de l'ionosphère vers l'équateur lors du remplissage de la plasmasphère (voir par exemple Banks et Holzer [1968]). Par contre, ces résultats sont en accord avec le mécanisme de remplissage des tubes de flux considéré comme un processus progressif et lent dans des modèles cinétiques [Lemaire, 1989].

Nous avons utilisé dans cette étude un modèle de champ magnétique (modèle interne IGRF 2000 et modèle externe Tsyganenko-96 [Tsyganenko et Stern, 1996]) afin d'aider l'analyse du gradient spatial des observations magnétiques de CLUSTER. Dans le même ordre d'idée, il est possible de comparer les gradients de densité de WHISPER, avec des gradients de modèles empiriques de la distribution de densité dans la plasmasphère, ce qui serait un prolongement complémentaire à cette thèse.

2.2 Structure à petite échelle

Parmi les structures à petite échelle, nous avons tout d'abord analysé une structure de densité observée à l'intérieur de la plasmasphère [Darrouzet et al., 2004]. L'utilisation d'outils d'analyse multipoints nous a apporté les résultats suivants: cette structure à petite échelle située dans la plasmasphère non loin de l'équateur magnétique est globalement en co-rotation (au niveau de la direction et de la magnitude), et elle est globalement alignée avec le champ magnétique. A l'aide d'une étude statistique de ces structures, nous pouvons conclure que leur présence est plus importante dans le cas d'une forte activité géomagnétique, et que leur existence rend l'identification précise de la plasmapause plus difficile. Ces structures de densité ont une taille équatoriale transversale distribuée exponentiellement, avec une valeur caractéristique de 365 km, pouvant aller jusqu'à 5000 km.

Ensuite, nous avons étudié dans le détail trois traversées de plasmasphère afin de comparer des observations de panaches plasmasphériques à l'aide de différents jeux de données: des observations de CLUSTER, IMAGE et LANL, ainsi que des simulations numériques [Darrouzet et al., 2006a]. Nous pouvons tout d'abord conclure que les missions CLUSTER et IMAGE sont très complémentaires, en raison de leurs techniques de mesure différentes (des mesures in-situ à haute résolution spatiale pour CLUSTER; de l'imagerie globale pour IMAGE). Cela permet une vision plus complète de la plasmasphère, et en particulier des panaches, que si ces observations étaient utilisées séparément.

Cependant, il est parfois difficile de détecter clairement le panache sur les images EUV, en raison de son seuil instrumental de densité relativement haut (40 ± 10 électrons cm^{-3}). En effet, les panaches ont souvent des densités plus basses, du moins au niveau de leur extrémité. Nous pouvons noter, qu'en raison de l'altitude élevée du périgée de CLUSTER (4 R_E), les satellites pénètrent dans la plasmasphère seulement dans le cas d'un indice K_p faible ou modéré. Dans tous les cas, en raison de la limite supérieure en fréquence de l'instrument WHISPER (80 kHz, correspondant à 80 cm^{-3}), les panaches ne doivent pas avoir une densité trop élevée pour être complètement observée (dans ce cas, la densité peut être déterminée en utilisant le potentiel du

satellite mesuré par l'instrument EFW, ce qui est cependant difficile à calibrer).

Notre étude des coquilles internes de la plasmasphère nous a montré qu'elles sont généralement en co-rotation avec la vitesse angulaire de la Terre. En outre, la vitesse de dérive tend à dévier de la vitesse de co-rotation à mesure que les satellites s'éloignent de l'axe de rotation de la Terre. Des structures ondulatoires avec une période d'environ 100 secondes ont parfois été observées. Cela pourrait être des ondes d'Alfvén, mais une étude plus poussée est nécessaire pour les identifier formellement.

Concernant les panaches eux-mêmes, les résultats obtenus avec CLUSTER, IMAGE ou les simulations numériques sont cohérents, que ce soit pour la position des panaches, ou pour leur taille. Les directions normales déterminées par différentes méthodes (délai temporel ou gradient spatial appliqué aux données de l'instrument WHISPER) aboutissent à des résultats similaires, et sont cohérents avec les observations d'EUV.

La composition ionique des panaches est similaire pour les trois événements, avec une grande proportion d'ion H^+, quelques traces d'ion He^+, mais pas d'ion O^+ (pour un des événements, car nous ne possédons pas de données pour les deux autres). Ces résultats sont cohérents avec une précédente étude effectuée par Dandouras et al. [2005].

L'analyse des vitesses de déplacement des panaches est également cohérente entre les différentes méthodes. La conclusion principale est que le panache est en rotation autour de la Terre, avec son pied attaché à la plasmasphère en complète co-rotation, alors que son extrémité se déplace également vers l'extérieur en s'éloignant de la Terre. Ces résultats sont cohérents avec la topologie d'un panache, s'étendant plus loin à des secteurs MLT précédents, comme cela a été montré dans une étude précédente [Spasojević et al., 2003].

Les simulations numériques de la position de la plasmapause utilisées dans cette thèse sont basées sur le modèle de champ électrique empirique E5D [McIlwain, 1986], dépendant de l'indice d'activité géomagnétique K_p, et sur le mécanisme d'instabilité d'interchange [Lemaire, 1975]. Elles reproduisent relativement bien la formation et le mouvement des panaches plasmasphériques, dans les cas où le niveau d'activité géomagnétique augmente soudainement d'un facteur suffisamment grand ($\Delta K_p > 2$). Cependant, il existe un décalage dans la position du panache entre les simulations numériques et les observations de CLUSTER et d'IMAGE. Celui-ci est dû à la résolution temporelle de l'indice utilisé dans le modèle, l'indice K_p. Le bon accord global avec les observations confirme que le modèle de champ électrique E5D est une représentation réaliste du champ électrique magnétosphérique de convection durant les intervalles de temps considérés ici et dans la plasmasphère extérieure. Cela conforte également le mécanisme d'instabilité d'interchange utilisé dans les simulations, mais n'écarte pas la possibilité que de tels panaches soient également créées avec d'autres types de simulations. Notons cependant que dans les trois événements analysés ici, les structures de densité ont une vitesse différente de la vitesse de co-rotation, et que les panaches ne se déplacent jamais vers l'intérieur, un résultat contraire aux prédictions de la théorie de la magnétohydrodynamique basée sur un champ électrique de convection uniforme dans la direction aurore-crépuscule. Cela démontre l'invalidité de tels modèles fluides et montre la nécessité d'utiliser des modèles cinétiques pour décrire la formation et l'évolution de la plasmapause.

Toutes ces études ont permis d'améliorer de manière significative la connaissance des propriétés spatio-temporelles de la distribution du plasma dans la plasmasphère, étape indispen-

sable vers une meilleure compréhension des processus physiques contribuant à la formation et à l'équilibre de cette région. Ces analyses ont été effectuées dans le cas de petites distances de séparation entre les satellites CLUSTER ($\approx 200\ km$). Cependant, la nouvelle configuration en place depuis l'été 2005 (trois satellites relativement proches ($\approx 1000\ km$) et le quatrième assez loin derrière les trois autres ($2 - 3\ R_E$) mais sur une orbite très proche de l'un des trois autres satellites), devrait ouvrir de nouvelles perspectives de recherches et d'études. Ainsi, les trois satellites pourraient permettre d'analyser la configuration spatiale d'une structure de densité de la plasmasphère, alors que le décalage du quatrième satellite devrait permettre d'étudier la dynamique ou l'évolution temporelle de cette même structure de densité.

Annexes

L’Annexe A décrit les systèmes de coordonnées et les paramètres magnétosphériques utilisés dans cette thèse. La méthode permettant de déterminer la densité de courant électrique est décrite dans l’Annexe B. La projection dans le plan équatorial magnétique est expliquée dans l’Annexe C, et la détermination de vitesses azimutales et radiales dans ce plan équatorial dans l’Annexe D. L’Annexe E est composée des articles publiés ou en cours de publication.

ANNEXE A

Coordonnées et Paramètres

1 Système de coordonnées

1.1 Système Géographique (GEO)

Ce système est centré sur le centre de la Terre, avec l'axe X inclu dans le plan équatorial de la Terre et passant par le méridien de Greenwich, l'axe Z parallèle à l'axe de rotation de la Terre et pointant vers le Nord, et l'axe Y complétant le trièdre direct (Figure A.1).

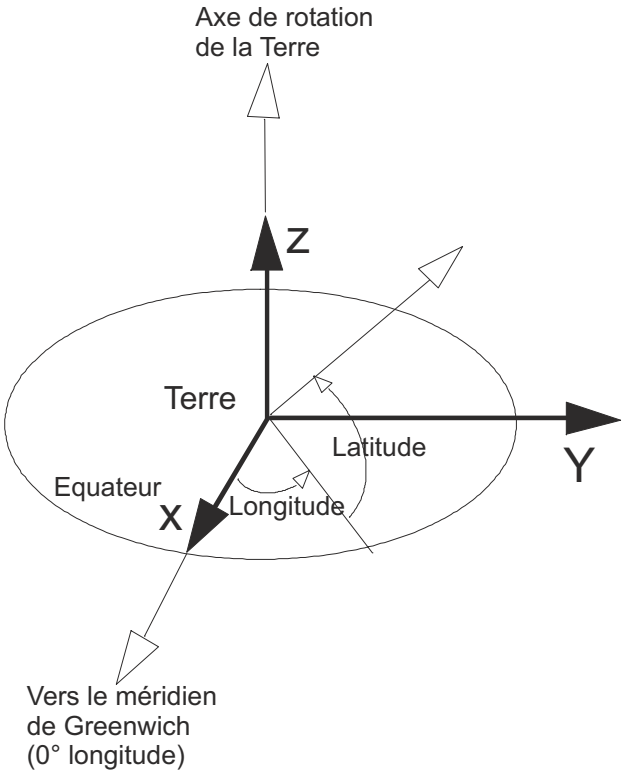

Figure A.1: *Système de coordonnées Géographique (GEO) (Adapté de [Robert, 2003]).*

1.2 Système Géocentrique Solaire Ecliptique (GSE)

Ce système est centré sur le centre de la Terre, avec l'axe X dirigé vers le Soleil, l'axe Z vers le pôle Nord de l'écliptique, et l'axe Y complétant le trièdre direct (Figure A.2).

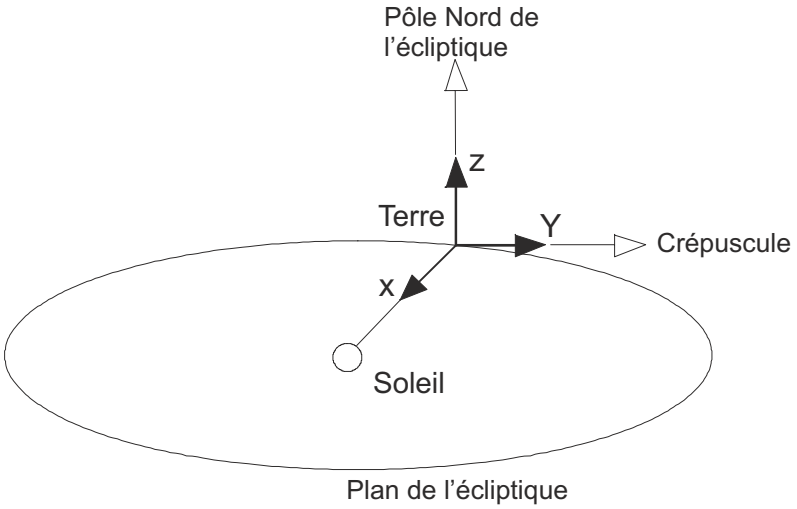

Figure A.2: *Système de coordonnées Géocentrique Solaire Ecliptique (GSE) (Adapté de [Robert, 2003]).*

1.3 Système Solaire Magnétique (SM)

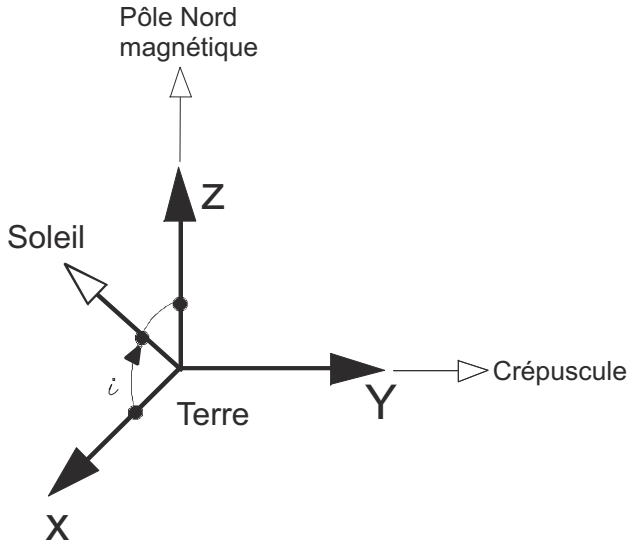

Figure A.3: *Système de coordonnées Solaire Magnétique (SM) (Adapté de [Robert, 2003]).*

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 dipole géomagnétique et pointant vers le Nord, et l'axe X complétant le trièdre direct (Figure A.3).

2 Paramètres Magnétosphériques

2.1 Indice d'activité géomagnétique: K_p

L'indice d'activité géomagnétique K_p a été introduit par J. Bartels et signifie "index planétaire"[1] [Bartels et al., 1939]. Il représente une mesure moyenne des variations du champ magnétique de la Terre basée sur les données d'un réseau de 13 observatoires géomagnétiques. Il est obtenu par la moyenne sur trois heures du niveau de variation de la composante horizontale du champ magnétique la plus perturbée. Cette moyenne est ensuite convertie sur une échelle logarithmique de 0 à 9.

2.2 Indice de perturbation géomagnétique: Dst

L'indice de perturbation géomagnétique Dst qui signifie "Disturbance storm-time" [Sugiura, 1964] est déterminé à partir de quatre magnétomètres au sol situés près de l'équateur. Cet indice est la mesure directe de la moyenne horaire de la composante Nord de la perturbation magnétique. De larges valeurs négatives de cet indice (< -100 nT) indiquent une augmentation de l'intensité du courant annulaire et durent en général quelques heures, alors que la décroissance du Dst dure beaucoup plus longtemps. L'ensemble de cette période s'appelle un orage magnétique.

2.3 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 avec l'équateur magnétique:

$$L = \frac{R}{\cos^2(\lambda)} \tag{A.1}$$

où R est la distance au centre de la Terre et λ la latitude magnétique. Ceci est exact dans le cas d'un modèle dipôlaire du champ magnétique, mais la définition est plus complexe dans le cas général [McIlwain, 1961].

2.4 Latitude invariante: $InvLat$

La latitude invariante $InvLat$ est définie comme la latitude du pied de la ligne de champ magnétique croisée par le point considéré.

[1] Allemand: Planetarische Kennziffer

2.5 Temps magnétique local: MLT

Le temps magnétique local MLT est défini à partir du système de coordonnées Solaire Magnétique: c'est la longitude dans ce système, du point considéré, mais évaluée en heures en considérant que 15 $^\circ$ correspondent à 1 heure MLT, et que 12:00 MLT correspond à la direction de l'axe X-SM dans le sens positif.

2.6 Distance équatoriale: R_{equat}

La distance équatoriale R_{equat} (exprimée en rayon terrestre) est la distance géocentrique de la ligne de champ magnétique passant par le point considéré, mesurée à l'équateur géomagnétique, qui est lui-même identifié comme étant le point le long de la ligne de champ où la magnitude du champ magnétique est minimum.

Pour déterminer ce paramètre, un modèle de champ magnétique est utilisé. Il combine un modèle interne (IGRF2000) et un modèle externe, que nous avons choisi être le modèle de Tsyganenko-96. Ce dernier dépend de la pression du vent solaire, de l'indice Dst et des composantes Y et Z du champ magnétique interplanétaire IMF[2]) [Tsyganenko et Stern, 1996]. Ces modèles sont déterminés à partir d'une librairie de routines pour des applications magnétosphériques: UNILIB (`http://www.oma.be/NEEDLE/unilib.php/20x/`).

Nous préférons utiliser R_{equat} au lieu du paramètre L, car L varie le long d'une ligne de champ magnétique, excepté pour un dipôle pur, alors que R_{equat} est constant le long d'une ligne de champ par définition. Des mesures effectuées au même R_{equat} et au même temps local se rapportent donc au même tube de flux magnétique.

[2] Anglais: Interplanetary Magnetic Field

ANNEXE B

Densité de Courant Electrique

L'outil gradient spatial peut également être appliqué aux composantes du champ magnétique ***B***. Ainsi, il est possible de déterminer le rotationnel du champ magnétique, et enfin la densité de courant électrique ***J*** à l'intérieur du tétraèdre, en utilisant la loi d'Ampère:

$$J = \frac{rot(\mathrm{B})}{\mu_0} \tag{B.1}$$

Les valeurs de la divergence de ***B*** nous donnent une estimation de la validité du calcul de la densité courant (voir aussi Vallat et al. [2005] et Dunlop et al. [2006]): des petites valeurs de la divergence montrent que l'hypothèse sur la condition d'homogénéité du milieu est valide.

ANNEXE C

Projection dans le Plan Equatorial Magnétique

La projection de différents vecteurs déterminés par CLUSTER (vitesses, directions normales et gradients spatiaux) dans le plan magnétique équatorial se fait en utilisant le même modèle de champ magnétique que pour la détermination du paramètre R_{equat} (voir Annexe A), c'est-à-dire le modèle interne IGRF2000 et le modèle externe Tsyganenko-96. Si nous avons un vecteur $\boldsymbol{u}$ déterminé en un point C, considérons un petit déplacement (de l'ordre de quelques kilomètres) de ce point C vers un point M avec la vitesse $\boldsymbol{u}$. Nous déterminons la projection C' de C comme étant le point le long de la ligne de champ magnétique passant par C où la magnitude du champ magnétique atteind son minimum. En effectuant de même avec le point M, nous obtenons le point M' et nous pouvons ainsi déterminer la vitesse projetée $\boldsymbol{u_{eq}}$ dans le plan équatorial magnétique. Cette technique est présentée sur la Figure C.1 (dans le cas simple d'un dipôle). Cette vitesse équatoriale n'a alors pas de composante dans la direction du champ magnétique, et nous pouvons ensuite décomposer cette vitesse en ses composantes azimutales et radiales.

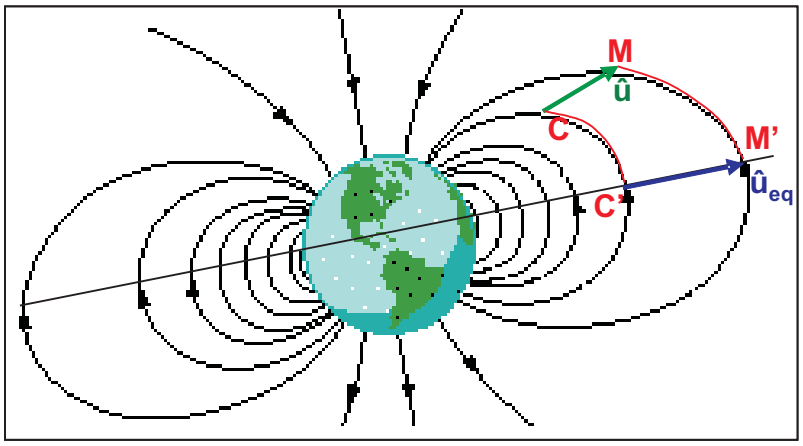

Figure C.1: *Croquis de la projection d'un vecteur vitesse dans le plan équatorial magnétique le long des lignes de champ magnétique (dans le cas simple d'un dipôle).*

ANNEXE D

Vecteurs Vitesses dans le Plan Equatorial

A partir d'une vitesse normale de frontière projétée dans le plan équatorial magnétique, il est possible d'en déduire d'autres vitesses. Ainsi, en faisant l'hypothèse que le plasma est en rotation dans la direction azimutale uniquement, nous pouvons déterminer une vitesse azimutale de plasma et une vitesse radiale de frontière apparente. La Figure D.1 montre comment une frontière gelée avec le plasma se déplace lorsque le plasma est en rotation, avec une vitesse azimutale de plasma V_{P-eq}, depuis sa position au temps t jusqu'à sa position au temps $t + \delta t$. Si nous définissons l'angle ϕ entre la vitesse normale de frontière et la direction radiale, ce déplacement implique que:

$$V_{N-eq} = V_{P-eq} \sin(\phi) \tag{D.1}$$

où V_{N-eq} est la vitesse normale de frontière que nous mesurons réellement. La vitesse azimutale de plasma V_{P-eq} peut ainsi être déduite et comparée avec la vitesse de complète co-rotation projetée dans le plan équatorial magnétique V_{C-eq}, que l'on déduit de la vitesse de complète co-rotation V_C, qui est elle-même déterminée au centre de masse des 4 satellites à l'aide de la relation suivante:

$$V_C = \frac{2\pi R}{(24 \times 24 \times 60)} \tag{D.2}$$

où R est la distance du centre de masse à l'axe de rotation de la Terre. La vitesse radiale de frontière apparente, V_{R-eq}, correspondant au déplacement radial apparent de la frontière lorsque celle-ci reste approximativement dans le même secteur MLT, est donnée par:

$$V_{R-eq} = \frac{V_{N-eq}}{\cos(\phi)} \tag{D.3}$$

Toutes ces vitesses sont résumées dans le Tableau 13.4 de la Section 13.4.

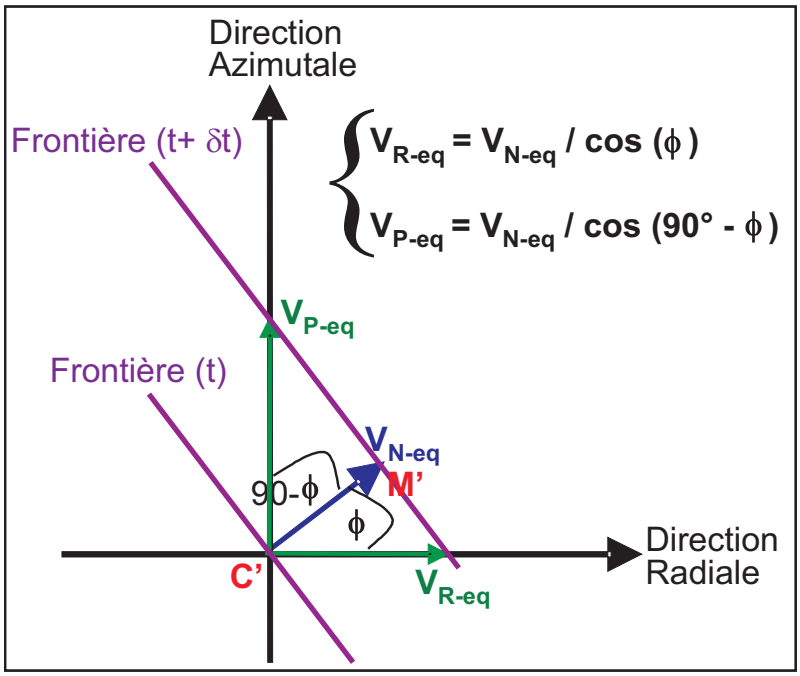

Figure D.1: *Définitions de trois vecteurs vitesse dans le plan équatorial magnétique: la vitesse normale de frontière V_{N-eq}, la vitesse azimutale de plasma V_{P-eq} et la vitesse radiale de frontière apparente V_{R-eq}.*

ANNEXE E

Articles Publiés

1 Article 1

Darrouzet, F., Spjeldvik, W. N., Lemaire, J. F., Gustafsson, G., Hann, C., et Dyck, C.
Towards statistical and empirical models of the distribution of VLF waves at high latitude from the observations of the Viking spacecraft
Adv. Space Res., 32(3), 323-328, 2003

Pergamon
www.elsevier.com/locate/asr
Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
doi: 10.1016/S0273-1177(03)00263-1

TOWARDS STATISTICAL AND EMPIRICAL MODELS OF THE DISTRIBUTION OF VLF WAVES AT HIGH LATITUDE FROM THE OBSERVATIONS OF THE VIKING SPACECRAFT

F. Darrouzet[1], W. N. Spjeldvik[2], J. F. Lemaire[1], G. Gustafsson[3], C. Hann[1], and C. Dyck[1]

[1]*Belgian Institute for Space Aeronomy, B-1180 Brussels, Belgium*
[2]*Department of Physics, Weber State University, Ogden, Utah 84408-2508, USA*
[3]*Swedish Institute of Space Physics, SE-75121 Uppsala, Sweden*

ABSTRACT

It is of considerable interest to compile a model of the low frequency electromagnetic wave intensity across the polar caps, in and around the auroral zones, as well as at lower latitudes. Waves are playing a dynamic role in the auroral region and can be used to characterize the level of activity in the magnetosphere. At middle latitudes, Very Low Frequency (VLF) and Extremely Low Frequency (ELF) waves are known to scatter trapped energetic electrons, alter their angular and energy distributions, and eventually cause their precipitation into the Earth's atmosphere where it affects the propagation of radio signals. We report here on the development of a data-based model of the electromagnetic power spectral density in the VLF band (10-46 kHz) as surveyed onboard the Swedish Viking spacecraft in the high-latitude region in the northern hemisphere. The data have been sorted into bins according to spatial location and wave frequency. A preliminary statistical model is presented showing the mean electric power spectral density versus magnetic local time and versus invariant latitude at fixed height intervals and for fixed frequency bands within the VLF range. Our data base includes 1162 data intervals, each of 15 min length, during March-December 1986. As a future goal, an empirical model fitting these averages with simple analytical functions may also be developed. This work also aims to associate observed plasma wave characteristics in a particular region of the magnetosphere with geomagnetic conditions. Progress in these directions is reported. © 2003 Published by Elsevier Ltd on behalf of COSPAR.

INTRODUCTION

Studies of plasma waves yield insight into magnetospheric phenomena that are controlled or strongly influenced by wave-particle interactions. It is well known that ELF and VLF waves within the plasmasphere influence the structure of the electron radiation belts (e.g., Lyons and Thorne, 1973) and possibly lower energy protons, and that the resulting mid-latitude energetic electron precipitation strongly influences the lower ionosphere at night and during magnetic storms (e.g., Spjeldvik and Thorne, 1976; Spjeldvik and Lyons, 1980). This is why URSI Commission H (Plasma waves) in 1999 approved a recommendation to encourage surveying and mapping the ELF and VLF wave environment. Detailed information can be found on the public WEB site of SEVEM (*Survey of ELF and VLF Experiments in the Magnetosphere*: http://www.magnet.oma.be/sevem/ index.html) (e.g., Darrouzet et al., 2001). The SEVEM project was established at the Belgian Institute for Space Aeronomy as an international effort to develop statistical and empirical distributions of ELF & VLF wave spectra in the magnetosphere. It follows up on pioneering work of NASA teams efforts in the 1960's and 1970's (e.g., Sawyer and Vette, 1976; Vette, 1991) on empirical statistical work on proton and electron distributions in the magnetosphere. SEVEM has been placed under the auspices of VERSIM, an IAGA/URSI Joint Working Group on *VLF/ELF Remote Sensing of Ionospheres and Magnetospheres* (http://www.nerc-bas.ac.uk/public/uasd/ versim.html).

Several isolated attempts to compile global world maps of VLF or ELF wave occurrence have been published in the past, but they did not get much attention. They would have remained unnoticed without the SEVEM Web

Adv. Space Res. Vol. 32, No. 3, pp. 323–328, 2003
© 2003 Published by Elsevier Ltd on behalf of COSPAR
Printed in Great Britain
0273-1177/$30.00 + 0.00

site where they are listed. A coordinated effort like that conducted within the SEVEM initiative could bring statistical studies and global mapping of wave phenomena to the space research community's forefront. Let us point out an important statistical study of low frequency waves in the equatorial plasmasphere that has been undertaken recently by Andre et al. (2002).

Plasma waves are prominently observed at high latitudes, in the auroral zone and in the geomagnetic cusp region, especially at low altitudes. In an effort to begin a systematic study of the high latitude region, we report here results from a statistical study of VLF wave power spectral densities observed in the northern hemisphere by the wave experiment V4H (Bahnsen et al., 1988) on the Swedish VIKING spacecraft from March to December 1986. The experiment measured two components of the electric field using two 80 m dipole antennae located perpendicular to the spin axis of the spacecraft. We have used only one component because the other one was very often corrupted or noisy. The signal has been Fourier-analyzed onboard Viking by a Stepped Frequency Analyzer, with, in standard operation, a time resolution of 2.4 sec and a frequency resolution of 1 kHz. These electric field power spectral densities were downloaded from a French data center, the CDPP (*Centre de Données de la Physique des Plasmas*: http://cdpp.cesr.fr/), (Darrouzet and Lemaire, 2002). We describe below the statistical rate of occurrence of 10-46 kHz VLF power spectral densities for geomagnetic invariant latitudes in the range 50-90 degrees, for magnetic local times (MLT) ranging from 0 to 24 hours, and for geographic altitudes ranging from 1500 to 13500 km.

STATISTICAL RESULTS

Invariant latitude dependence

It is reasonably expected that wave activity should exhibit significant variations with spatial location. Figure 1 depicts the statistical results for the period March-December 1986 as overall VLF power spectral densities at 10-46 kHz and MLT=00-24 hr, i.e., no resolution in magnetic local time. The four panels show the electric field power spectral densities in invariant latitude bins: 50-60, 60-70, 70-80 and 80-90 deg. Each panel plots curves for the four altitude bins we have used: 3000, 6000, 9000 and 12000 km, each with height range ±1500 km.

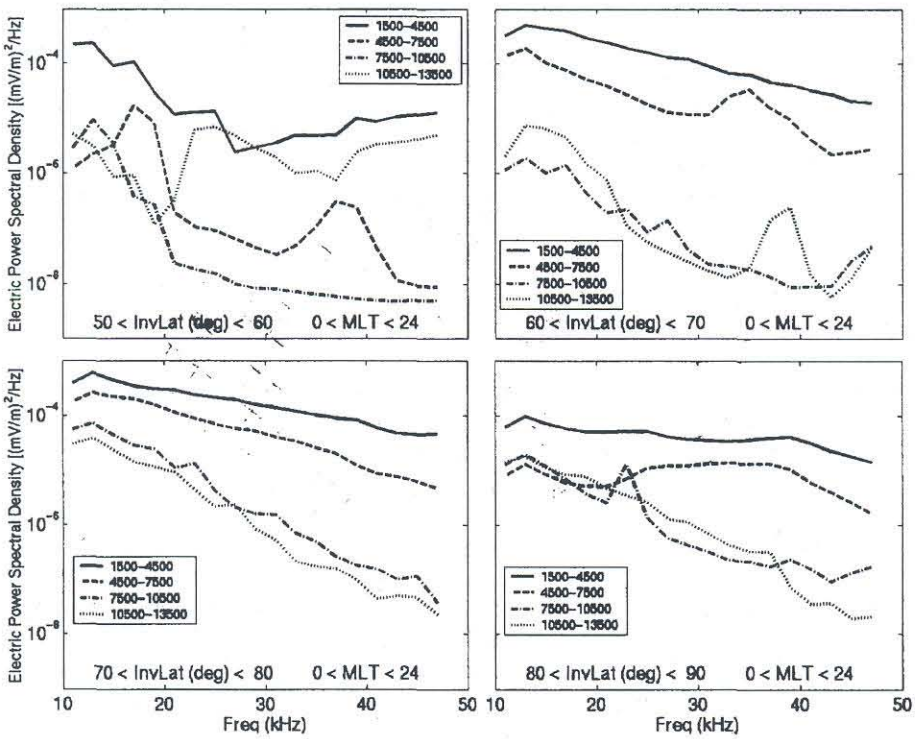

Fig. 1. VLF electric field power spectral densities versus frequency averaged over all magnetic local times are shown for different ranges of invariant latitudes in the Northern Hemisphere. The data are collected over the period March-December, 1986 by the V4H experiment onboard the Swedish Viking spacecraft.

The wave data at low invariant latitudes (50-60 deg) and middle altitude (4500-10500 km) indicate lower wave intensity above 20-25 kHz. The rather irregular spectra indicate either that there are peaks in the spectra or

that the sample is not homogeneous. Additional data are needed to check these hypotheses. This situation is changed at 60-70 deg invariant latitude where the low altitude data exhibit a near power-law distribution in the whole range of VLF frequencies. This power-law spectrum is observed up to 80 deg invariant latitude. In contrast, at very high invariant latitudes the spectra flatten out at 15-35 kHz and suggest significant wave intensity with power spectral plateau-to-peak at 30-35 kHz. In a more detailed study, we will also examine the dependence of these average spectra on the level of geomagnetic activity and magnetic local time.

Magnetic local time dependence

It is reasonable to expect magnetic local time variations of the VLF wave intensity (from magnetospheric emissions), and also some wave energy contributions from man-made sources (VLF transmitters that have geographic longitude and latitude distributions). Nevertheless, much of the naturally occurring wave energy is expected to stem from magnetospheric sources, such as auroral wave-particle interactions, polar cusp region (quasi-standing?) waves, the magnetopause current layer, wave-particle interaction induced wave growth, and other phenomena. The four panels in Figure 2 illustrate the magnetic local time variations of the VLF electric field waves as seen in the night sector (MLT=21-03 hr), the dawn sector (MLT=03-09 hr), the noon sector (MLT=09-15 hr), and the dusk sector (MLT=15-21 hr). In each panel we have plotted the electric field intensities at altitudes: 3000, 6000, 9000 and 12000 km (each with height range ±1500 km). This figure averages over all invariant latitudes (50-90 deg) in this study, and as latitudinal averages we notice that the VLF waves are most intense in the night sector (MLT=21-03 hr) and at the lower altitudes, below 7500 km. The dawn sector data illustrate wave intensities that are somewhat more evenly distributed over altitudes, and roughly following power laws over the 10-40 kHz frequency interval. The front side of the magnetosphere at MLT=09-15 hr shows lesser intense VLF waves, particularly at the higher frequencies. There is a remarkably large qualitative difference between the night side (first panel) and the dusk side (last panel), so that in the dusk sector our statistically averaged data demonstrate little altitude dependence of the wave intensities. Indeed, the intensities at the different altitudes are largely overlapping. Except in the day side, it seems that the wave intensity decreases with altitude.

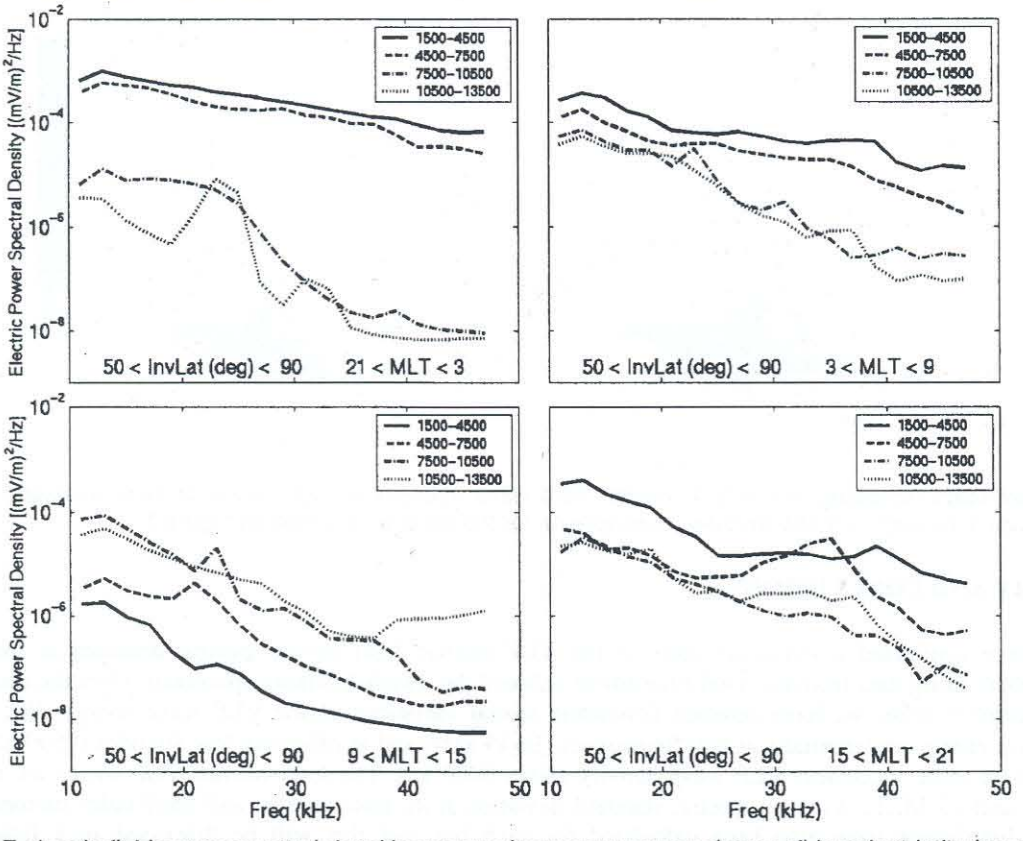

Fig. 2. VLF electric field power spectral densities versus frequency averaged over all invariant latitudes are shown for different ranges of magnetic local times in the Northern Hemisphere, for the same time period as Figure 1.

Frequency dependence

We have detected a significant variation of the VLF electric field intensity with altitude, magnetic local time, and invariant latitude. The altitude dependence is also strongly frequency dependent. At 10-19 kHz, the more intense waves are found at the lower altitudes (1500-2500 km) and at the lower invariant latitudes (54-60 deg). The trend shifts towards higher altitudes (2500-5500 km) with higher latitudes (66-80 deg). This trend appears much weaker, and the wave intensities are lower, when higher VLF wave frequencies are considered. For example, at 19-28 kHz and at higher frequencies the waves are primarily present at 70-80 deg invariant latitude and at 2500-4000 km. These results are exhibited in Figure 3 which is a gray scale binned distribution with the four panels containing the selected VLF frequency bins (10-19, 19-28, 28-37, 37-46 kHz), and each panel having a 24-bin height resolution between 1500 and 13500 km versus a 20-bin invariant latitude resolution from 50 to 90 deg.

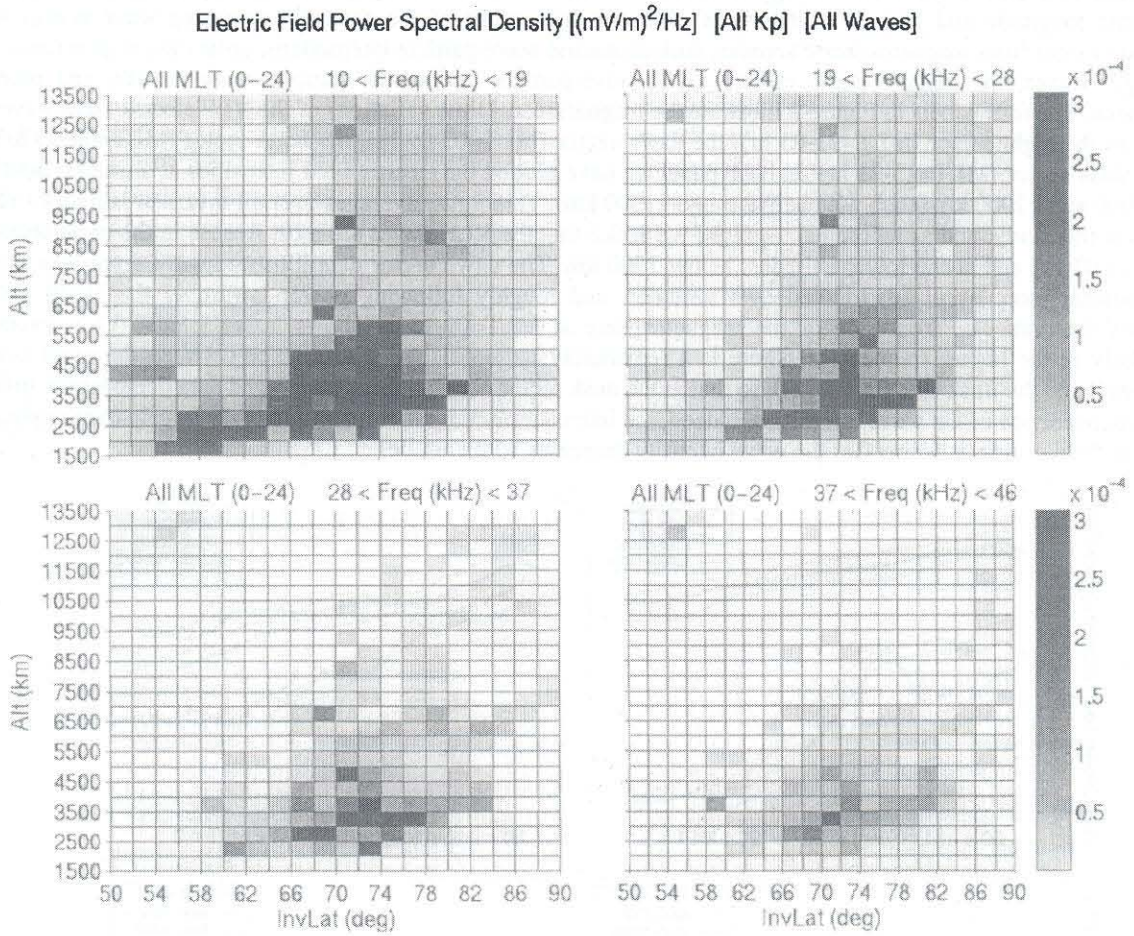

Fig. 3. Gray scale rendering of the VLF electric field wave intensity in four frequency bins averaged over all magnetic local time sectors in the Northern Hemisphere, for the same time period as Figure 1.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

We have conducted a statistical study of the VLF electric field power spectral densities in the Earth's magnetosphere using data from the V4H experiment onboard the Swedish Viking spacecraft. Over the time period March-December 1986, we have detected systematic spatial variations of the VLF wave energy. We find the highest wave energy preferentially at low frequencies (10-19 kHz) and at relatively low altitudes (1500-5500 km). There appears to be much less VLF wave activity above 6000 km. The least intense VLF waves are observed between 9 and 15 MLT. Average spectra, standard deviation from this average, and third order moment of the statistical distribution have also been calculated for each bin, but this will be discussed in a future more comprehensive paper.

In this study, we display power spectral densities rather than wave amplitudes as in the work of Andre et al. (2002), in order to be consistent with most earlier statistical studies (e.g., Green and Boardsen, 1999; Parrot, 1990). In fact, power spectral densities measured at the geostationary altitude were the basis for computations of magnetic radial diffusion coefficients in the Earth's radiation belts (e.g., Arthur et al.,1978; Lanzerotti et al., 1978).

During the time span considered in our study there were naturally several magnetic storms and substorms. The data have been collected over a wide range of geomagnetic conditions as reflected in the histogram of the Kp-index, AE-index and other measurements of the level of geomagnetic activity. Figure 4 illustrates the histogram of Kp-index values during the period over which the data have been collected. The Kp distribution shows that values of 1 to 3 (low activity) are most prevalent, but there are few data sets with Kp>5.

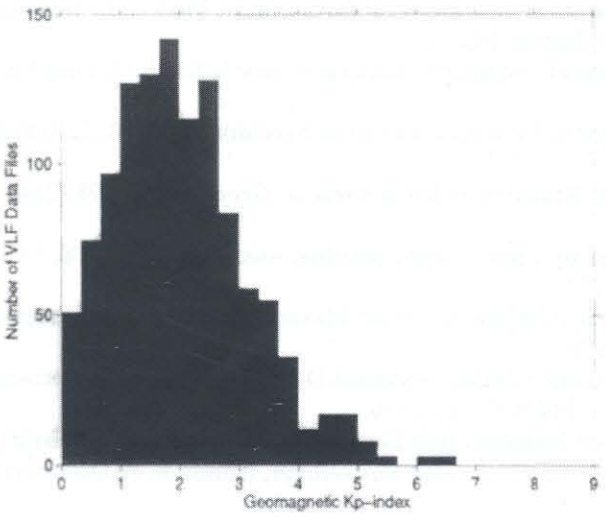

Fig. 4. Distribution of geomagnetic Kp-index values of the time intervals during which the 1162 V4H data files used in this study have been collected between March and December 1986.

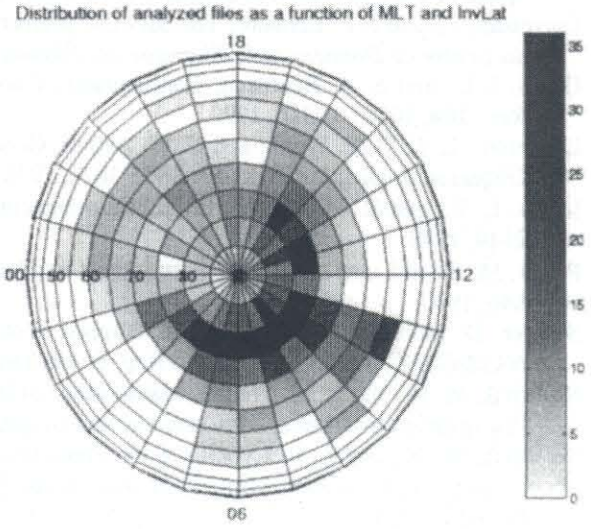

Fig. 5. Distribution as a function of magnetic local time and invariant latitude of the 1162 V4H data files used in this study collected between March and December 1986.

Future research will be directed towards delineating the VLF wave emissions during different geophysical conditions, and will include data from the ELF frequency range as well, which are available from the V4L experiment of Viking. Due to the limited coverage of the database, it is not yet appropriate to attempt to fit the average with analytical and parametrical functions in order to build an empirical model.

This study has been based on electric field data from one spacecraft, which recorded measurements during 10 months but only in the northern hemisphere. This is why the distribution of the data as a function of magnetic local time and invariant latitude shown on Figure 5 is not equally distributed in space. Most of the data used in this work are at MLT between 3 to 15 hr, and at invariant latitude above 60 deg. This indicates the necessity to continue similar statistical studies with other suitable well instrumented spacecraft with durable data collection. Multi-spacecraft missions, like Cluster, are of course ideal in order to have statistical models of low frequency waves in other parts of magnetosphere. In a next step it would be valuable to extend our modeling effort by using the WHISPER and STAFF wave experiments. Furthermore, with these modern wave data, other Stokes parameters of the VLF waves could be determined in addition to the power spectral densities. Therefore more comprehensive statistical and empirical models could be developed in the future with the Cluster wave observations.

ACKNOWLEDGMENTS

This study has been conducted at the Belgian Institute of Space Aeronomy in Brussels in the framework of the PRODEX CLUSTER and SEVEM projects supported by the OSTC (Belgian Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs). This support is acknowledged by the authors. We are also very grateful to Dr. A. Bahnsen, principal investigator of the V4H experiment for giving us permission to use these data which are archived at the CDPP in Toulouse. We gratefully acknowledge the support and excellent cooperation of Chris Harvey and his team at the CDPP.

REFERENCES

Andre, R, F. Lefeuvre, F. Simonet, et al., A First Approach to Model the Low-Frequency Wave Activity in the Plasmasphere, *Ann. Geophysicae*, **20**, 981-996, 2002.

Arthur, C. W, R. L. McPherron, and L. J. Lanzerotti, Geomagnetic Field Fluctuations at Synchronous Orbit, 1. Power Spectra, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3859-3865, 1978.

Bahnsen, A., M. Jespersen, E. Ungstrup, et al., First Viking Results: High Frequency Waves, *Phys. Scripta*, **37**, 469-474, 1988.

Darrouzet, F., J. F. Lemaire, and A. Orr, The SEVEM Project: Statistical ELF and VLF Environment Models, *Space Science Research in Belgium, 1994-2000*, 103-107, 2001.

Darrouzet, F., and J. F. Lemaire, The SEVEM project: Statistical ELF and VLF Environment Models, *Le Bulletin du Centre de Données de la Physique des Plasma*, **N5**, Janvier 2002.

Green, J. L., and S. A. Boardsen, Confinement of nonthermal continuum radiation to low latitudes, *J. Geophys. Res.*, **104**, 10307-10316, 1999.

Lanzerotti, L. J., D. C. Webb, and C. W. Arthur, Geomagnetic Field Fluctuations at Synchronous Orbit, 2. Radial Diffusion, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3866-3870, 1978.

Lyons, L. R., and R. M. Thorne, Equilibrium Structure of Radiation Belt Electrons, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2142-2149, 1973.

Parrot, M., World map of ELF/VLF emissions as observed by a low-orbiting satellite, *Ann. Geophysicae*, **8**, 135-146, 1990.

Sawyer, D. M., and J. I. Vette, AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum, *NASA/GSFC, NSSDC/WDC-R&S* Rep. 76-06, Dec. 1976.

Spjeldvik, W. N., and R. M. Thorne, Maintenance of the Middle Latitude Nocturnal D-Layer by Energetic Electron Precipitation, *Journal of Pure and Applied Geophysics*, **114**, 497-508, 1976.

Spjeldvik, W. N., and L. R. Lyons, On the Predictability of Radiation Belt Electron Precipitation into the Earth's Atmosphere Following Magnetic Storms, *Solar-Terrestrial Predictions Proceedings*, (editor: R. F. Donnelly), IV, B59, 1980.

Vette, J. I., The AE-8 Trapped Electron Model Environment, *NASA/GSFC, NSSDC/WDC-A-R&S* Rep. 91-24, Maryland, 1991.

E-mail address of F. Darrouzet: Fabien.Darrouzet@oma.be

Manuscript received 28 November 2002; accepted 23 December 2002

2 Article 2

Darrouzet, F., Décréau, P. M. E., De Keyser, J., Masson, A., Gallagher, D. L., Santolik, O., Sandel, B. R., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., Le Guirriec, E., Canu, P., Sedgemore, F., André, M., et Lemaire, J. F.

Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations

Ann. Geophys., 22, 2577-2585, 2004

Annales Geophysicae (2004) 22: 2577–2585
SRef-ID: 1432-0576/ag/2004-22-2577
© European Geosciences Union 2004

Annales Geophysicae

Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations

F. Darrouzet[1], P. M. E. Décréau[2], J. De Keyser[1], A. Masson[3], D. L. Gallagher[4], O. Santolik[5,*], B. R. Sandel[6], J. G. Trotignon[2], J. L. Rauch[2], E. Le Guirriec[2], P. Canu[7], F. Sedgemore[8], M. André[9], and J. F. Lemaire[1]

[1]Belgian Institute for Space Aeronomy (IASB-BIRA), 1180 Brussels, Belgium
[2]Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE/CNRS), Université d'Orléans, 45071 Orléans, France
[3]Research and Scientific Support Department (RSSD), ESTEC-ESA, 2201-AG Noordwijk, The Netherlands
[4]Marshall Space Flight Center (MSFC), NASA, Huntsville, AL 35805, USA
[5]Faculty of Mathematics and Physics (MFF), Charles University, 121 16 Prague, Czech Republic
[6]Lunar and Planetary Laboratory (LPL), University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA
[7]Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP/CNRS), Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 78140 Vélizy, France
[8]Formerly at Danish Space Research Institute (DSRI), 2100 Copenhagen, Denmark
[9]Swedish Institute of Space Physics (IRFU), Uppsala division, 751 21 Uppsala, Sweden
[*]also at Institute of Atmospheric Physics (IAP/CAS), 141 31 Prague, Czech Republic

Received: 1 October 2003 – Revised: 11 May 2004 – Accepted: 18 May 2004 – Published: 14 July 2004

Part of Special Issue "Spatio-temporal analysis and multipoint measurements in space"

Abstract. The electron density profiles derived from the EFW and WHISPER instruments on board the four Cluster spacecraft reveal density structures inside the plasmasphere and at its outer boundary, the plasmapause. We have conducted a statistical study to characterize these density structures. We focus on the plasmasphere crossing on 11 April 2002, during which Cluster observed several density irregularities inside the plasmasphere, as well as a plasmaspheric plume. We derive the density gradient vectors from simultaneous density measurements by the four spacecraft. We also determine the normal velocity of the boundaries of the plume and of the irregularities from the time delays between those boundaries in the four individual density profiles, assuming they are planar. These new observations yield novel insights about the occurrence of density irregularities, their geometry and their dynamics. These in-situ measurements are compared with global images of the plasmasphere from the EUV imager on board the IMAGE satellite.

Key words. Magnetospheric physics (plasmasphere) – Space plasma physics (general or miscellaneous)

1 Introduction

The plasmasphere is a toroidal region in the inner magnetosphere populated by cold (a few eV or less), dense ($10–10^4$ particles/cm^3) ion and electron populations of ionospheric origin. It has been investigated by satellites and ground-based instruments (Lemaire and Gringauz, 1998, and references therein). The outer boundary of the plasmasphere, the plasmapause, has been discovered independently from ground-based whistler wave observations (Carpenter, 1963) and from in situ satellite measurements (Gringauz, 1963). It is often characterized by a sharp decrease in the plasma density, from 100–1000 particles/cm^3 down to a few particles/cm^3. This knee is formed at an equatorial distance ranging from 2 to 8 Earth radii, depending on the level of the geomagnetic activity.

The Cluster mission is the first multi-spacecraft mission that surveys the plasmasphere. This paper focuses on Cluster observations of density structures. Before the Cluster mission, large fluctuations in the electron number density had been observed by OGO 5 (Chappell et al., 1970a), by CRRES near the plasmapause (LeDocq et al., 1994), by magnetospheric plasma analyzers on board geosynchronous satellites (Moldwin et al., 1995), and by various other ground-based and spacecraft instruments (see review by Carpenter and Lemaire, 1997). Density structures had also been inferred from high-resolution magnetometer data obtained during the Earth swing-by of Cassini (Southwood et al., 2001) by interpreting the magnetic field strength variations as signatures of diamagnetic plasma elements produced by the interchange instability (Lemaire, 1975). More recently, small-scale plasmaspheric density structures have been reported by the Radio Plasma Imager (RPI) on board IMAGE (Carpenter et al., 2002), and in the dusk sector by WHISPER on board Cluster (Décréau et al., submitted, 2004 [1]). Large-scale density structures have also been observed in the past and called

Correspondence to: F. Darrouzet
(fabien.darrouzet@oma.be)

[1]Décréau, P. M. E., Le Guirriec, E., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Canu, P., Darrouzet, F., Lemaire, J., Masson, A., Sedgemore, F., and André, M.: Plasmapause formation and density irregularities: Cluster observations in the dusk sector, Adv. Space Res., submitted, 2004.

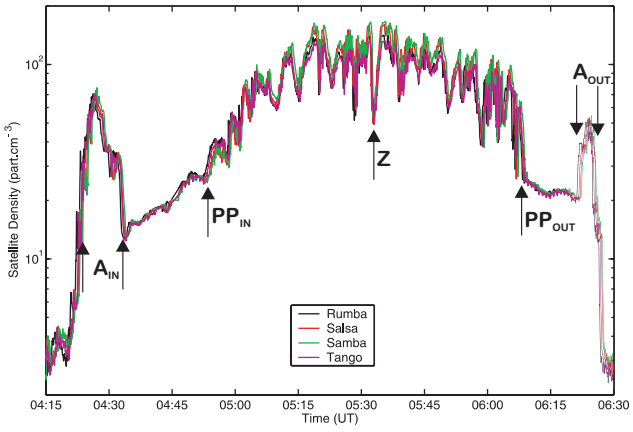

Fig. 1. Cluster electron density profiles derived from WHISPER and EFW as a function of time for the plasmasphere crossing on 11 April 2002, around 21:30 MLT and with K_p=3. A_{IN} and A_{OUT} are the plasmaspheric plume crossings in the inbound and outbound passes, respectively, studied in Sect. 4.2, Z is the density irregularity discussed in Sect. 4.3, and PP_{IN} and PP_{OUT} are the plasmapause positions in the inbound and outbound crossings.

"detached plasma elements" or "plasmaspheric tails" (Chappell et al., 1970b; Horwitz et al., 1990). Recently, such structures, now called "plasmaspheric plumes", have been routinely observed by the global plasmaspheric imaging made by the Extreme Ultraviolet (EUV) imager on board IMAGE (Sandel et al., 2001; Goldstein et al., 2004). The formation of these plumes has been predicted by different theoretical models, based on a time dependent convection electric field (Grebowsky, 1970; Chen and Grebowsky, 1974), or based on the interchange instability mechanism (Lemaire, 2000; Pierrard and Lemaire, 2004).

The purpose of this paper is to report density structure observations by Cluster in the plasmasphere. After presenting the electron density data sets in Sect. 2, a statistical study of the occurrence of density irregularities as a function of magnetic local time (MLT) and geomagnetic activity will be discussed in Sect. 3. Section 4 focuses on the plasmasphere crossing on 11 April 2002, using WHISPER observations as well as other instruments on board Cluster. Coordinated observations from EUV complement the Cluster data for this event. Section 5 presents a summary and conclusions.

2 Electron density data set

The four Cluster spacecraft cross the plasmasphere near perigee (around 4 R_E) every 57 h (Escoubet et al., 1997). These crossings go from the Southern to the Northern Hemisphere and uniformly cover all MLT sectors due to the yearly precession of Cluster. The electron density is obtained by combining data from two experiments: the Waves of HIgh frequency and Sounder for Probing Electron density by Relaxation, WHISPER (Décréau et al., 1997, 2001) and the Electric Field and Wave experiment, EFW (Gustafsson et al., 1997).

The WHISPER sounder unambiguously identifies the electron plasma frequency F_{pe} (the time resolution is 52 s in normal mode). F_{pe} is related to the electron density N_e by: $F_{pe}\{\text{kHz}\}\sim[81\,N_e\{\text{cm}^{-3}\}]^{1/2}$ (Trotignon et al., 2001, 2003). F_{pe} can also be inferred from the WHISPER passive measurements by estimating the low frequency cut-off of natural emissions, which is equal to F_{pe} (the time resolution is 2.2 s in normal mode). EFW measures the potential difference V_{sc} between each antenna probe and the spacecraft (the spacecraft potential) every 0.2 s. The V_{sc}-N_e relationship is nonlinear and depends mainly on the electron plasma state (Pedersen, 1995; Laakso and Pedersen, 1998).

On a given Cluster perigee pass, the EFW measurements can be calibrated using the WHISPER observations, so as to infer 0.2 s electron density data (Pedersen et al., 2001). This calibration works well in the plasmasphere, but it is, however, only possible in regions where the frequency is below 80 kHz, i.e. the upper frequency limit of WHISPER. Above this instrumental threshold, N_e has been inferred from V_{sc} only, using a method presented by Moullard et al. (2002). Figure 1 depicts N_e as a function of time for the 11 April 2002 plasmasphere crossing; this particular event will be discussed in detail in Sect. 4.

In order to facilitate an intercomparison of the four Cluster density profiles, a combination of the internal magnetic field model IGRF95 and the external magnetic field model Tsyganenko-96 (Tsyganenko and Stern, 1996) is used to trace the magnetic field line from the spacecraft position to the geomagnetic equator. The IGRF95 and Tsyganenko-96 models are computed with the Unilib library (Library of routines for magnetospheric applications: http://www.oma.be/NEEDLE/unilib.php/20x/index.html). The geomagnetic equator is identified as the location where the magnetic field strength reaches a minimum. The geocentric distance of this equatorial point is called R_{equat} and is expressed in units of Earth radii. We prefer to use R_{equat} instead of the McIlwain L parameter (McIlwain, 1961), since it is easier to interpret: L varies along a magnetic field line, except for a pure dipole, whereas R_{equat} is by definition constant along a field line.

3 Occurrence of density irregularities

We have analyzed 33 plasmasphere crossings by the four satellites, i.e. a total of 264 inbound and outbound plasmapause crossings. We have used the K_p index to evaluate the geomagnetic activity level, as in most previous studies of the plasmasphere. The plasmapause is assumed to be formed in the midnight sector following the theory that interchange motion is driven unstable along the Roche Limit surface (Lemaire, 1975, 2001). To try to compensate for the plasmasphere's rotation, a time delayed K_p value is chosen that corresponds to the time elapsed since the observed structure passed the midnight meridian (assuming full corotation). The instantaneous value of K_p is used when the spacecraft are between 21:00 and 03:00 MLT, the maximum value of K_p in the preceding 6 h is used between 03:00 and

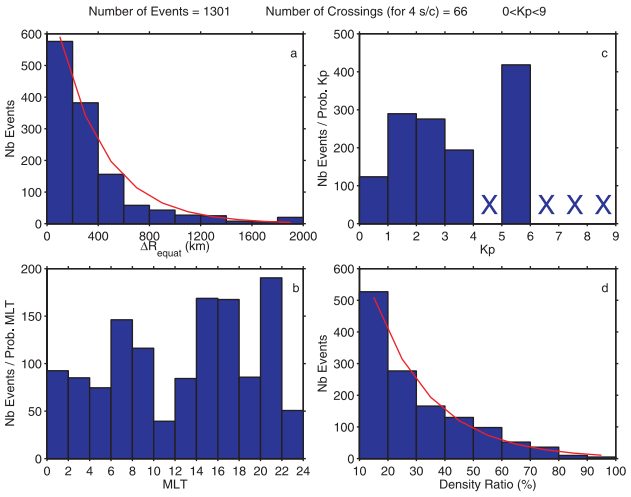

Fig. 2. Statistical results on the density irregularities observed during all 264 plasmasphere crossings: **(a)** the number of events as a function of the transverse equatorial size ΔR_{equat} (in km), **(b)** the MLT distribution divided by the probability to have a MLT in each range, **(c)** the K_p distribution divided by the probability to have a K_p in each range (a cross means no data), and **(d)** the density ratio. The red curves are exponential least-squares fitting curves.

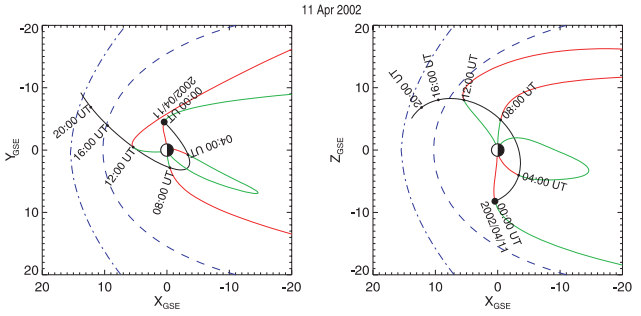

Fig. 3. Orbit of Cluster 3 in the XY and XZ GSE planes indicated by a solid black line, with tick marks every 4 h. The dashed blue line indicates the position of the magnetopause and the bow shock is indicated by the dot-dashed blue line. When inside the magnetosphere, a magnetic field line has been traced from each tick mark location to the surface of the Earth or the magnetopause. Tracings parallel to the field (south-north) are shown in green and tracings anti-parallel (north-south) in red. (Courtesy of Cluster ground-based working group.)

09:00 MLT, the maximum value in the previous 12 h between 09:00 and 15:00 MLT, and the maximum value in the previous 18 h between 15:00 and 21:00 MLT. In the remainder of the paper, K_p will denote this time delayed value.

Our sample contains only a few plasmasphere crossings for $K_p \geq 4$, in part because of the rather low probability for such a high level of activity. The fact that the Cluster spacecraft do not cross the plasmasphere for $K_p \geq 6$ confirms that in case of high geomagnetic activity, the plasmapause forms closer to the Earth, below the Cluster perigee, which is around 4 R_E. In any case, the spacecraft remain in the outer plasmasphere.

Density irregularities have been defined by a density depletion ratio of at least 10%. Panel (a) of Fig. 2 gives the occurrence of these irregularities as a function of their transverse equatorial size ΔR_{equat} (in km). Panels (b) and (c) show, respectively, the MLT and K_p distribution of the irregularities weighted by the MLT and K_p occurrence probability. Panel (d) gives the density ratio.

This survey suggests that there are more density irregularities in the dawn, afternoon and post-dusk sectors. It is interesting to note that two of these sectors correspond to the sectors where the plasmapause tends to be thicker. Irregularities rarely occur in the pre-noon and midnight sectors. Their transverse equatorial size and density depletion ratio distributions are exponential (following the red least-squares fitting curves on Fig. 2) with a characteristic size of 365 km and a characteristic density ratio of 20%. The larger ones (in size) are observed when K_p is small ($K_p < 2$). This is in part due to the fact that large ones cannot exist for high K_p since the plasmasphere then is small. For K_p below 2 (figure not shown here), more density structures are observed in the dawn sector, while most of them are found in the dusk sector when K_p is above 2. As expected, there are more density irregularities during and after periods of high geomagnetic activity, suggesting that they are generated near dusk by variations in the magnetospheric convection electric field. But as mentioned before, our sample has few cases with high K_p and is therefore biased in this respect.

Irregular density profiles are predicted by plasmaspheric models that simulate the convection and refilling processes, like the CDPDM model (Galperin et al., 1997) and the self-consistent RICE model (Spiro et al., 1981). Plasmaspheric refilling can produce density irregularities in the equatorial region (Singh, 1988; Singh and Horwitz, 1992). Turnings of the interplanetary magnetic field (IMF) influence the convection and might be responsible for the formation of density structures (Goldstein et al., 2002; Spasojević et al., 2003); IMF orientation might therefore be a useful alternative parameter to analyse the density irregularities distribution. Plasma interchange motion can also create density irregularities (Lemaire, 2001).

4 Case study (11 April 2002)

We have studied in more detail the plasmasphere crossing on 11 April 2002, between 21:40 and 21:10 MLT and with K_p=3. The spacecraft separation was small (around 150 km). Figure 3 indicates the spacecraft orbits by a solid black line with tick marks every 4 h. The mean position of the magnetopause and of the bow shock is indicated by dashed and dot-dashed blue lines, respectively. When inside the magnetosphere, a magnetic field line has been traced from each tick mark location to the surface of the Earth or to the magnetopause.

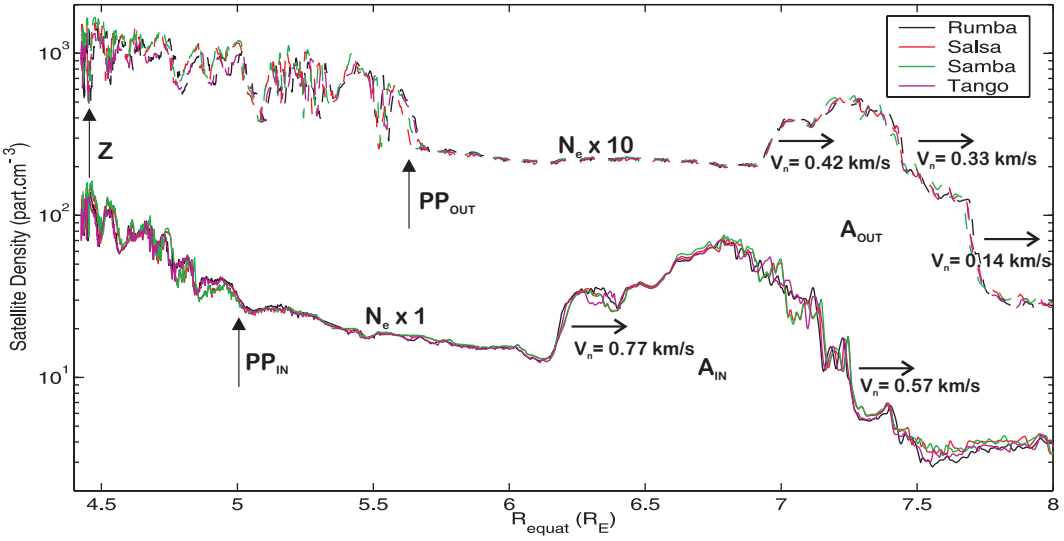

Fig. 4. Electron density profiles as a function of R_{equat} for the plasmasphere crossing on 11 April 2002. The lower four curves correspond to the inbound pass and the upper four curves (shifted by a factor 10) to the outbound pass. The normal boundary velocities V_n of the plume crossings A_{IN} and A_{OUT} are indicated on the figure.

Figure 4 plots the electron density profiles of Fig. 1 but as a function of R_{equat} as defined in Sect. 2. The density profiles for the inbound pass are shown by the lower set of four curves and those for the outbound pass by the upper set of four curves (shifted by a factor 10). A plasmaspheric plume is seen in the inbound (A_{IN}) and outbound (A_{OUT}) passes. In the outbound pass the plume is narrower in R_{equat} scale and is observed at higher R_{equat}. A lot of irregularities are visible in the plasmasphere. There are more density irregularities during the outbound pass (16) than during the inbound one (10). It is difficult to say if the four spacecraft cross the same density structures in both hemispheres during both passes, because we do not clearly recognize the same patterns on both sides of the equator, except for the plumes. There may be differences in the plasma density structures over small distances (hundreds of kilometres) and/or these structures may have changed over the time interval (tens of minutes) between both crossings.

4.1 Analysis techniques

To study plasmaspheric plumes and density irregularities with the Cluster constellation, we rely on two different four-point techniques described in Sects. 4.1.1 and 4.1.2. These are applied to the plasmaspheric plume traversals A_{IN} and A_{OUT} in Sect. 4.2 and to the density irregularities inside the plasmasphere in Sect. 4.3. In addition, we present in Sect. 4.1.3 how the EUV experiment on board the IMAGE spacecraft has been used to compare global images of the plasmasphere with in-situ Cluster results.

4.1.1 Density gradient

We compute the density gradient along the trajectory of the centre of mass of the Cluster tetrahedron. The method described by Harvey (1998) and Darrouzet et al. (2002) is used. The density gradient is determined from simultaneous measurements of the density, postulating that the four points of measurement are close enough to each other, so that all spacecraft are embedded in the same structure at the same time. The gradient can then be taken constant over the tetrahedron. The similarity of the four density profiles in Fig. 1 indicates that this assumption is approximately valid during this crossing: The density differences between the spacecraft come from small-scale irregularities, not large-scale.

The computation of a gradient is inherently a difficult operation: It involves differencing quantities of similar magnitude and thus results in large relative errors. To reduce such errors, we filter away, prior to computing the gradient, any variations at a time scale shorter than what we are interested in, by smoothing the density profiles with a time resolution of 20 s (100 km spatial resolution), which is the average time delay between the spacecraft. Furthermore, when the density is close to an extremum, the density gradient should be interpreted with caution.

4.1.2 Velocities

We distinguish in the following sections three different velocities: normal boundary velocity, azimuthal plasma velocity and radial boundary velocity.

We derive the velocity of a density structure boundary in the normal direction of the interface, V_n, with a time delay method. Assuming a boundary to be a planar surface travelling at a constant velocity along its normal, we determine this velocity from individual spacecraft times and positions of the boundary crossings.

If the plasma is only co-rotating, i.e. moving in the azimuthal direction, the normal boundary velocity, V_n, is the

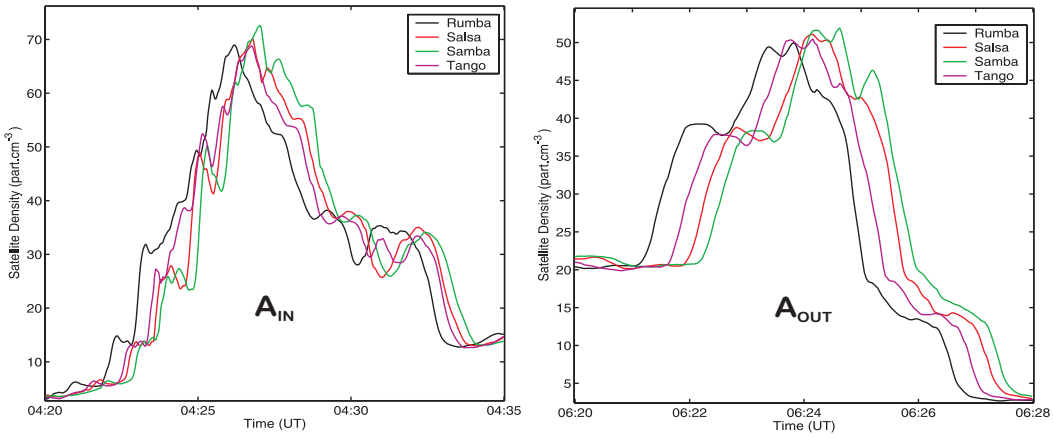

Fig. 5. Electron density profiles as a function of time of the two plume crossings A_{IN} and A_{OUT} observed on the inbound and outbound legs of the plasmasphere crossing on 11 April 2002.

projection of the azimuthal plasma velocity, V_p, on the normal boundary direction: V_n=$V_p$sinθ, with θ the angle between the normal and the outward radial direction.

The radial boundary velocity, V_r, which can be computed from the displacement of the boundary of a structure in the radial direction (at fixed MLT), is also related to the normal boundary velocity by: V_n=$V_r$cosθ.

4.1.3 EUV images

The Extreme Ultraviolet (EUV) imager on board the IMAGE spacecraft (Burch, 2000) provides global images of the plasmasphere with a spatial resolution of 0.1 R_E every 10 min. The EUV instrument works by detecting 30.4 nm sunlight resonantly scattered by singly ionized helium (Sandel et al., 2000). Because of IMAGE high apogee ($\sim$7 R_E) and the EUV imager's wide field of view, images acquired at apogee show the structure of the entire plasmasphere. Sequences of such 2-D images show the shape of the plasmasphere, its evolution over time, and the motion of plasma irregularities at the plasmapause as well as inside the plasmasphere, illustrating the convection pattern.

The EUV images have been reprocessed to filter away the noise (apparent as high frequency spatial variations in the image) based on the fact that the larger scale density distribution in the plasmasphere (and a fortiori the emission intensities in the EUV images, which are line-of-sight integrations) is rather smooth. Histogram equalization and an appropriate color scale were used to improve the contrast in the images.

4.2 Plasmaspheric plume

The calculated normal boundary velocities V_n of the plasmaspheric plume crossings A_{IN} and A_{OUT} shown in Fig. 4 range between 0.14 to 0.77 km/s. The velocity of the spacecraft, 4.6 km/s, is significantly larger. The velocities along the inbound pass are larger at the inner edge of the structure than at the outer edge, and also larger than those measured along the outbound pass. This is consistent with the assumption of an azimuthal motion of the plume, and with the topology of a plume getting thinner and extending farther out at earlier MLT (see Fig. 12 in Spasojević et al., 2003). Indeed the plume is crossed almost 2 h later in the outbound pass, and then it is observed to be thinner and at larger equatorial distance. The angle θ between the normal and the radial direction is between 20 and 70°. This implies an azimuthal plasma velocity V_p of the structures between 0.3 and 1 km/s. This is less than 30% of the co-rotation speed, which is 3.2 km/s at the spacecraft radial distance. This indicates that these structures are not fully co-rotating, which is in agreement with results from the EDI instrument (Paschmann et al., 1997) on board Cluster in the same region (Matsui et al., 2003).

Since the Cluster orbit remains roughly at the same MLT during the whole crossing, we can estimate the radial boundary velocity V_r from the displacement between the inbound and outbound passes. The inner edge of this plume shifts 5100 km in 110 min, which corresponds to V_r=0.77 km/s. θ is 40° for this interface, which implies V_n=0.60 km/s. This speed is comparable to the 0.77 km/s determined from the timing analysis in the inbound pass. For the outer edge, V_r is 0.42 km/s, θ is 50°, then V_n is 0.27 km/s, which has to be compared with 0.57 km/s.

The density gradient analysis cannot be applied here. The density profiles of both structures plotted as a function of time in Fig. 5 show that the four spacecraft successively cross the same structure, but they are never embedded in it at the same time because the boundaries are too narrow and/or because the spacecraft are not close enough. The density profiles of the plume A_{OUT} are very similar and are just shifted in time. This structure apparently does not change much on a time scale of 1 min. The conservation of the crossing order by the four spacecraft confirms that this structure is moving progressively with respect to the spacecraft in the normal direction. While the density profiles for A_{IN} plotted as a function of time on Fig. 5 seem to differ somewhat between

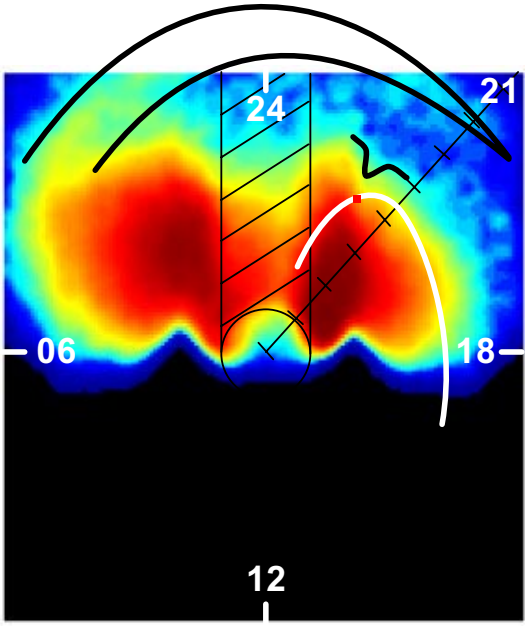

Fig. 6. EUV image at 04:32 UT on 11 April 2002. The image has been smoothed by a spatial low frequency filter. Contrast has been enhanced by means of a nonlinear color scaling based on histogram equalization. The black circle corresponds to the approximate size and position of the Earth, with its shadow extending towards the opposite direction to the Sun. The plume is delimited by the black line and one density irregularity is indicated by the small black indentation. The white curve is the trajectory of the four Cluster satellites between 3 h before and 3 h after the time of this EUV image, and the red dot corresponds to the position of the Cluster spacecraft at 04:32 UT.

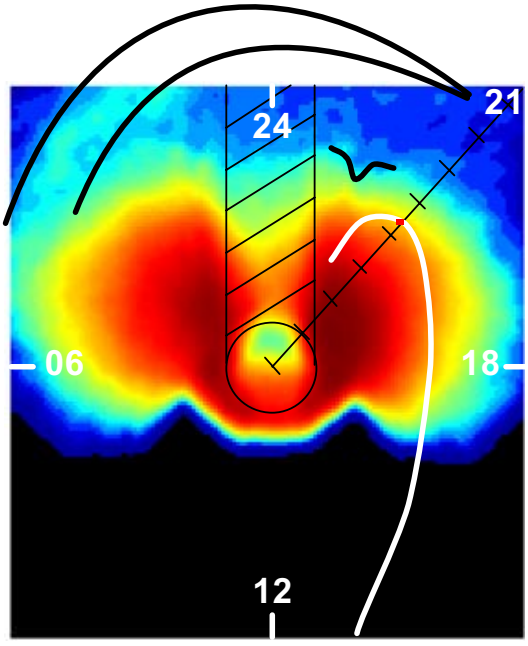

Fig. 7. EUV image at 06:04 UT on 11 April 2002 (same type as Fig. 6).

the spacecraft, the density profiles as a function of R_{equat} in Fig. 4 are much more similar, showing the usefulness of the spatial equatorial view, which removes the time lag between the four spacecraft, and also the differences in latitude. The density gradient can be reliably calculated in the region between each plume crossing and the very perturbed plasmasphere proper. The values are very small, showing that the medium is very uniform there.

Figure 6 shows an EUV image of the plasmasphere at 04:32 UT on 11 April 2002 (around the timing of the inbound crossing of the plume by the Cluster satellites). IMAGE was then located high above the northern pole. The Sun is towards the bottom of this picture and the size and location of the Earth are indicated by the black circle, prolonged by the Earth's shadow extending through the plasmasphere in the opposite direction of the Sun. The plume is delimited by the wide black line. The black area in this image corresponds to a data gap. The white curve is the trajectory of the four Cluster satellites projected along a field line onto the equatorial plane. The red dot corresponds to the location of the Cluster spacecraft at 04:32 UT. It should be pointed out that image intensities scale with line-of-sight densities that are not necessarily projected onto the equatorial plane, but as the satellite is located at high altitude above the pole, the plane of view of the EUV instrument is close to the equatorial plane. Therefore, the distances expressed in R_{equat} are only approximate.

At 21:40 MLT, the position of the plasmapause determined from the EUV picture (as the sharp boundary between the green and the blue part) is around R_{equat}=4.7 R_E. This is close to the plasmapause detection at 5 R_E by Cluster at 04:55 UT. A plasmaspheric plume is clearly seen on this figure in the post-midnight sector (between 01:00 and 03:00 MLT), with the centre extending from R_{equat}=6.2 R_E (where the plume is attached to the plasmasphere) to 6.6 R_E (where it leaves the EUV field of view) and with a transverse size of about 1.4 R_E. Less pronounced is a structure between 20:30 and 22:00 MLT, which might be the tail of the plume, whereas there is a gap in the observation of this supposed global plume on the EUV image. The centre of this structure extends from R_{equat}=6.7 to 7 R_E, and has a transverse size of about 0.7 R_E. These EUV observations are consistent with the large plume structure seen by Cluster in the inbound crossing around 04:30 UT, at 21:40 MLT, between R_{equat}=6.2 and 7.2 R_E, and in the outbound crossing around 06:20 UT, at 21:10 MLT, between R_{equat}=6.9 and 7.7 R_E. The fact that this feature is not so clearly seen in the evening sector is due to its low density, close to the EUV threshold density of 40±10 particles/cm^3, as estimated by Goldstein et al. (2003). This is consistent with the densities measured by Cluster. The density decrease from the inbound to the outbound pass (2 h later) is also consistent with being in the tail of the plume. Figure 7 is of the same type as Fig. 6, but at 06:04 UT. The plume is still present in the post-midnight sector, and it has rotated during the 90 min between the two pictures.

The shape of the plume in the EUV images is consistent with the topology of the plume deduced from Cluster measurements in terms of position, size and intensity. It is surprising to observe such a long and long-lived structure in this low to moderate geomagnetic situation. Cluster and IMAGE provide complementary views of the plasmasphere, each with its own point of view and different time and space resolution.

4.3 Density irregularities inside the plasmasphere

As an example of density irregularities inside the plasmasphere, we focus on a small structure observed around 05:30 UT (indicated on Figs. 1 and 4 by the letter Z). Being close to the equator at that time, the trajectories of the four spacecraft are almost parallel to the magnetic field. The density gradient is parallel to the XY plane (Fig. 8) and nearly perpendicular to the magnetic field (its projections onto the plane of reference are shown by black arrows in this figure). This density gradient lies in the equatorial plane, as expected for a density structure close to the equator.

The normal boundary velocity of the inner interface of this plasma element, as determined from the time delay method, is V_n=1.90 km/s. Its projections onto the GSE planes (orange arrows on Fig. 8) show a large component in the X-direction. This density irregularity being observed well inside the plasmasphere, at 4.5 R_E, the assumption of azimuthal motion is justified. The angle θ between the direction of the density gradient, which is the normal direction, and the radial direction, is 55°. The measured V_n then implies an azimuthal plasma velocity V_p=2.3 km/s, which is essentially the co-rotation speed at this equatorial distance (2.1 km/s). The same result is obtained for the outer part of this density irregularity (2.2 km/s). That confirms that this density element is indeed fully co-rotating. This is consistent with the EDI drift velocity statistical analysis (Matsui et al., 2003). These results are also in agreement with velocity measurements from the CIS experiment (Rème et al., 2001), in the RPA mode (ion energies from about 0 to 25 eV) that show a motion of the density irregularities inside the plasmasphere in the co-rotation direction (Dandouras, 2003, personal communication).

The order of crossing by the four spacecraft is the same in the inbound and in the outbound crossing, which means that the structure is simply rotating with the plasma around the Earth. Repeating the same analysis for several other density irregularities, we conclude that most of them move with an azimuthal velocity between 1.5 and 2 km/s in a direction that has a small Z-component, which coincides more or less with the co-rotation velocity. It is interesting to note that the STAFF experiments on board Cluster (Cornilleau-Wehrlin et al., 2003) observe a good correlation of whistler-mode emissions with these density irregularities.

The density irregularities observed with WHISPER inside the plasmasphere are not clearly seen at the same time in the EUV image (on Figs. 6 and 7) because of the spatial resolution of the EUV instrument, which cannot resolve structures

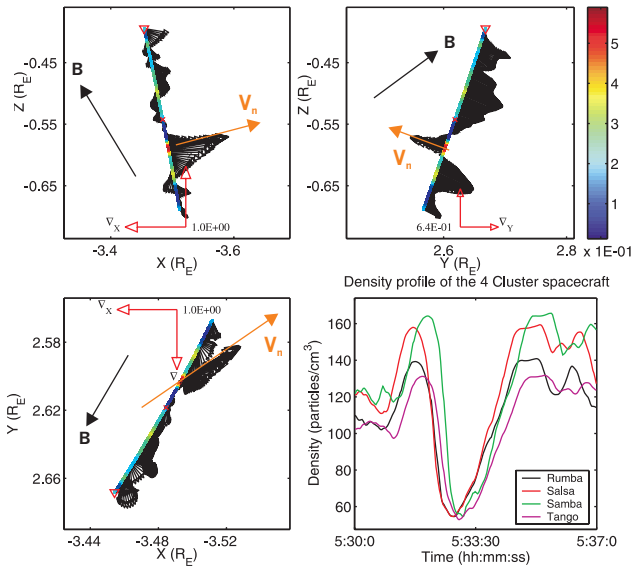

Fig. 8. Density gradient vector projections onto the XY, YZ, and XZ GSE planes for the density irregularity Z observed in the plasmasphere on 11 April 2002. B is the magnetic field and V_n is the normal boundary velocity of the inner edge of Z. The density of the four spacecraft is plotted as a function of time in the lower right panel.

with a size smaller than 0.1 R_E, and because of the line-of-sight integration. The EUV images clearly show co-rotating plasmapause indentations (as indicated on Figs. 6 and 7), but it is difficult to ascertain the correspondence with structures observed by Cluster.

5 Summary and conclusion

Over 260 Cluster plasmasphere crossings have been examined in this first analysis. Density irregularities are often, though not always, seen in the plasmasphere and at the plasmapause. Their existence makes the identification of the actual plasmapause knee more difficult. The density irregularities have a transverse equatorial size that is exponentially distributed, with a characteristic value of 365 km going up to 5000 km. They have a characteristic density ratio of 20%. There are more density irregularities when the level of geomagnetic activity is higher. There seems to be an MLT asymmetry in their distribution. All these results show that the plasmasphere is a much more complex and dynamic region than considered so far from earlier experimental observations as well as from some early theoretical models and MHD simulations.

In a case study of the plasmasphere crossing on 11 April 2002, with small separation between the four Cluster spacecraft and with a good conjunction with the IMAGE spacecraft, a large plasmaspheric plume is observed outside the plasmasphere. This large-scale feature persists during a long period of time, but its width and position change between the inbound and the outbound passes. This evolution

can be explained by the azimuthal motion of a plume that becames thinner and extends farther out at earlier MLT. This plasmaspheric plume topology is confirmed by EUV images.

This case study also revealed many density irregularities inside the plasmasphere, which are mostly co-rotating around the Earth. Co-rotating density structures are also seen by EUV on board IMAGE. These results are in agreement with observations from other instruments on board Cluster (CIS and EDI). The density gradients in these irregularities are perpendicular to the magnetic field in the equatorial region, showing that these irregularities are field aligned. We observe small-scale variability in the density profiles from Cluster, both spatially and temporally.

As expected, there are more density irregularities during and after periods of high geomagnetic activity, likely related to the mechanism of their formation. Once created, these structures are partially or fully co-rotating around the Earth. For the event studied, the IMF B_z turned southward and northward several times in the hours and day preceding the crossing. This could have been a trigger to form the density structures reported here.

A more complete statistical analysis is needed to confirm these preliminary conclusions. Indeed, a larger sample of plasmapause crossings is needed for this purpose. This analysis will be performed in the mid-term future over the full Cluster database.

Acknowledgements. F. Darrouzet, J. De Keyser, and J. F. Lemaire acknowledge the support by the Belgian Federal Science Policy Office through the CLUSTER/PRODEX-7 project (contract n°13127/98/NL/VJ (IC)).

Topical Editor T. Pulkkinen thanks Y. Ebihara and another referee for their help in evaluating this paper.

References

Burch, J. L.: IMAGE mission overview, Space Sci. Rev., 91, 1–14, 2000.

Carpenter, D. L.: Whistler evidence of a "knee" in the magnetospheric ionization density profile, J. Geophys. Res., 68, 1675–1682, 1963.

Carpenter, D. L. and Lemaire, J.: Erosion and recovery of the plasmasphere in the plasmapause region, Space Sci. Rev., 80, 153–179, 1997.

Carpenter, D. L., Spasojević, M. A., Bell, T. F., Inan, U. S., Reinisch, B. W., Galkin, I. A., Benson, R. F., Green, J. L., Fung, S. F., and Boardsen, S. A.: Small-scale field-aligned plasmaspheric density structures inferred from the Radio Plasma Imager on IMAGE, J. Geophys. Res., 107, 1258, doi:10.1029/2001JA009199, 2002.

Chappell, C. R., Harris, K. K., and Sharp, G. W.: 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, 1970a.

Chappell, C. R., Harris, K. K., and Sharp, G. W.: The morphology of the bulge region of the plasmasphere, J. Geophys. Res., 75, 3848–3861, 1970b.

Chen, A. J. and Grebowsky, J. M.: Plasma tail interpretations of pronounced detached plasma regions measured by Ogo 5, J. Geophys. Res., 79, 3851–3855, 1974.

Cornilleau-Wehrlin, N., Chanteur, G., Perraut, S., Rezeau, L., Robert, P., Roux, A., de Villedary, C., Canu, P., Maksimovic, M., de Conchy, Y., Hubert, D., Lacombe, C., Lefeuvre, F., Parrot, M., Pincon, J. L., Décréau, P. M. E., Harvey, C. C., Louarn, Ph., Santolik, O., Alleyne, H., Roth, M., Chust, T., Le Contel, O., and STAFF team: First results obtained by the Cluster STAFF experiment, Ann. Geophys., 21, 437–456, 2003.

Darrouzet, F., Décréau, P. M. E., and Lemaire, J.: The Cluster Mission, Preliminary Results Obtained with the WHISPER Experiment, Physicalia Magazine, 24, 1–16, 2002.

Décréau, P. M. E., Fergeau, P., Krasnoselskikh, V., Lévêque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Sené, F. X., Trotignon, J. G., Canu, P., Mögensen, 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.

Décréau, P. M. E., Fergeau, P., Krasnoselskikh, V., Le Guirriec, E., Lévêque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Rauch, J. L., Sené, F. X., Séran, H. C., Trotignon, J. G., Canu, P., Cornilleau, N., de Féraudy, H., Alleyne, H., Yearby, K., Mögensen, P. B., Gustafsson, G., André, M., Gurnett, D. A., Darrouzet, F., Lemaire, J., Harvey, C. C., Travnicek, P., and Whisper experimenters: Early results from the Whisper instrument on CLUSTER: an overview, Ann. Geophys., 19, 1241–1258, 2001.

Escoubet, C. P., Russell, C. T., and Schmidt, R.: The Cluster and Phoenix Missions, Kluwer Academic Publishers, 1997.

Galperin, Y. I., Soloviev, V. S., Torkar, K., Foster, J. C., and Veselov, M. V.: Predicting plasmaspheric radial density profiles, J. Geophys. Res., 102, 2079–2091, 1997.

Goldstein, J., Spiro, R. W., Reiff, P. H., Wolf, R. A., Sandel, B. R., Freeman, J. W., and Lambour, R. L.: IMF-driven overshielding electric field and the origin of the plasmaspheric shoulder of May 24, 2000, Geophys. Res. Lett., 29, (16), doi:10.1029/2001GL014534, 2002.

Goldstein, J., Spasojević, M., Reiff, P. H., Sandel, B. R., Forrester, W. T., Gallagher, D. L., and Reinisch, B. W.: Identifying the plasmapause in IMAGE EUV data using IMAGE RPI in situ steep density gradients, J. Geophys. Res., 108, 1147, doi:10.1029/2002JA009475, 2003.

Goldstein, J., Sandel, B. R., Thomsen, M. F., Spasojević, M., and Reiff, P. H.: Simultaneous remote sensing and in situ observations of plasmaspheric drainage plumes, J. Geophys. Res., 109, A03202, doi:10.1029/ 2003JA010281, 2004.

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.

Grebowsky, J. M.: Model study of plasmapause motion, J. Geophys. Res., 75, 4329–4333, 1970.

Gustafsson, G., Boström, R., Holback, B., Holmgren, G., Lundgren, A., Stasiewicz, K., Ahlen, L., Mozer, F. S., Pankow, D., Harvey, P., Berg, P., Ulrich, R., Pedersen, A., Schmidt, R., Butler, A., Fransen, A. W. C., Klinge, D., Thomsen, M., Fälthammar, C. G., Lindqvist, P.-A., Christenson, S., Holtet, J., Lybekk, B., Sten, T. A., Tanskanen, P., Lappalainen, K., and Wygant, J.: The electric field and wave experiment for the Cluster mission, Space Sci. Rev., 79, 137–156, 1997.

Harvey, C. C.: Spatial gradient and the volumetric tensor, in: Analysis methods for Multi-Spacecraft data, edited by Paschmann, G. and Daly, P. W., ISSI Scientific Report SR-001, 307–322, 1998.

Horwitz, J. L., Comfort, R. H., and Chappell, C. R.: A statistical characterization of plasmasphere density structure and boundary

locations, J. Geophys. Res., 95, 7937–7947, 1990.

Laakso, H. and Pedersen, A.: Ambient electron density derived from differential potential measurements, in Measurements Techniques in Space Plasmas, edited by Borovsky, J., Pfaff, P., and Young, D., AGU Monograph 102, AGU Washington D.C., 49–54, 1998.

LeDocq, M. J., Gurnett, D. A., and Anderson, R. R.: Electron number density fluctuations near the plasmapause observed by the CRRES spacecraft, J. Geophys. Res., 99, 23 661–23 671, 1994.

Lemaire, J. F.: The mechanisms of formation of the plasmapause, Ann. Geophys., 31, 175–190, 1975.

Lemaire, J. F. and Gringauz, K. I.: The Earth's Plasmasphere, with contributions from Carpenter, D. L. and Bassolo, V., Cambridge University Press, 372, 1998.

Lemaire, J. F.: The formation plasmaspheric tails, Phys. Chem. Earth (C), 25, 9–17, 2000.

Lemaire, J. F.: The formation of the light-ion-trough and peeling off the plasmasphere, J. Atmos. Terr. Phys., 63, 1285–1291, 2001.

Matsui, H., Quinn, J. M., Torbert, R. B., Jordanova, V. K., Baumjohann, W., Puhl-Quinn, P. A., and Paschmann, G.: Electric field measurements in the inner magnetosphere by Cluster EDI, J. Geophys. Res., 108, 1352, doi:10.1029/2003JA009913, 2003.

McIlwain, C. E.: Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles, J. Geophys. Res., 66, 3681–3691, 1961.

Moldwin, M. B., Thomsen, M. F., Bame, S. J., McComas, D., and Reeves, G. D.: The fine-scale structure of the outer plasmasphere, J. Geophys. Res., 100, 8021–8030, 1995.

Moullard, O., Masson, A., Laakso, H., Parrot, M., Décréau, P. M. E., Santolik, O., and André, M.: Density modulated whistler mode emissions observed near the plasmapause, Geophys. Res. Lett., 29, (20), doi:10.1029/2002GL015101, 2002.

Paschmann, G., Melzner, F., Frenzel, R., Vaith, H., Parigger, P., Pagel, U., Bauer, O. H., Haerendel, G., Baumjohann, W., Sckopke, N., Torbert, R. B., Briggs, B., Chan, J., Lynch, K., Morey, K., Quinn, J. M., Simpson, D., Young, C., McIlwain, C. E., Fillius, W., Kerr, S. S., Maheu, R., and Whipple, E. C.: The Electron Drift Instrument for Cluster, Space Sci. Rev. 79, 233–269, 1997.

Pedersen, A.: Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements, Ann. Geophys., 13, 118–129, 1995.

Pedersen, A., Décréau, P., Escoubet, C. P., Gustafsson, G., Laakso, H., Lindqvist, P.-A., Lybekk, B., Masson, A., Mozer, F., and Vaivads, A.: Four-point high resolution information on electron densities by the electric field experiments (EFW) on Cluster, Ann. Geophys., 19, 1483–1489, 2001.

Pierrard, V. and Lemaire, J. F.: Development of shoulders and plumes in the frame of the interchange instability mechanism for plasmapause formation, Geophys. Res. Lett., 31, L05809, doi:10.1029/2003GL018919, 2004.

Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J. M., Dandouras, I., Lavraud, B., Sauvaud, J. A., Barthe, A., Bouyssou, J., Camus, Th., Coeur-Joly, O., Cros, A., Cuvilo, J., Ducay, F., Garbarowitz, Y., Medale, J. L., Penou, E., Perrier, H., Romefort, D., Rouzaud, J., Vallat, C., Alcaydé, D., Jacquey, C., Mazelle, C., d'Uston, C., Möbius, E., Kistler, L. M., Crocker, K., Granoff, M., Mouikis, C., Popecki, M., Vosbury, M., Klecker, B., Hovestadt, D., Kucharek, H., Kuenneth, E., Paschmann, G., Scholer, M., Sckopke, N., Seidenschwang, E., Carlson, C. W., Curtis, D. W., Ingraham, C., Lin, R. P., McFadden, J. P., Parks, G. K., Phan, T., Formisano, V., Amata, E., Bavassano-Cattaneo, M. B., Baldetti, P., Bruno, R., Chionchio, G., Di Lellis, A., Marcucci, M. F., Pallocchia, G., Korth, A., Daly, P. W., Graeve, B., Rosenbauer, H., Vasyliunas, V., McCarthy, M., Wilber, M., Eliasson, L., Lundin, R., Olsen, S., Shelley, E. G., Fuselier, S., Ghielmetti, A. G., Lennartsson, W., Escoubet, C. P., Balsiger, H., Friedel, R., Cao, J.-B., Kovrazhkin, R. A., Papamastorakis, I., Pellat, R., Scudder, J., and Sonnerup, B.: First multi-spacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment, Ann. Geophys., 19, 1303–1354, 2001.

Sandel, B. R., Broadfoot, A. L., Curtis, C. C., King, R. A., Stone, T. C., Hill, R. H., Chen, J., Siegmund, O. H. W., Raffanti, R., Allred, D. D., Turley, R. S., and Gallagher, D. L.: The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission, Space Sci. Rev., 91, 197–242, 2000.

Sandel, B. R., King, R. A., Forrester, W. T., Gallagher, D. L., Broadfoot, A. L., and Curtis, C. C.: Initial Results from the IMAGE Extreme Ultraviolet Imager, Geophys. Res. Lett., 28, (8), 1439–1442, 2001.

Singh, N.: Refilling of a plasmaspheric flux tube: microscopic plasma processes, in Modeling Magnetospheric Plasma, edited by Moore, T. E. and Waite, J. H., AGU Geophysical Monograph 44, 87–99, Washington D.C., 1988.

Singh, N. and Horwitz, J. L.: Plasmaspheric refilling: recent observations and modelling, J. Geophys. Res., 97, 1049–1079, 1992.

Southwood, D. J., Dougherty, M. K., Balogh, A., Cowley, S. W. H., Smith, E. J., Tsurutani, B. T., Russell, C. T., Siscoe, G. L., Erode, G., Glassmeier, K.-H., Gleim, F., and Neubauer, F. M.: Magnetometer measurements from the Cassini Earth swing-by, J. Geophys. Res., 106, 30 109–30 128, 2001.

Spasojević, M., Goldstein, J., Carpenter, D. L., Inan, U. S., Sandel, B. R., Moldwin, M. B., and Reinisch, B. W.: Global response of the plasmasphere to a geomagnetic disturbance, J. Geophys. Res., 108, 1340, doi:10.1029/2003JA009987, 2003.

Spiro, R. W., Harel, M., Wolf, R. A., and Reiff, P. H.: Quantitative simulation of a magnetospheric substorm, 3. Plasmaspheric electric fields and evolution of the plasmapause, J. Geophys. Res., 86, 2261–2272, 1981.

Trotignon, J. G., Décréau, P. M. E., Rauch, J. L., Randriamboarison, O., Krasnoselskikh, V., Canu, P., Alleyne, H., Yearby, K., Le Guirriec, E., Séran, H. C., Sené, F. X., Martin, Ph., Lévêque, M., and Fergeau, P.: 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., Le Guirriec, E., Canu, P., and Darrouzet, F.: The Whisper Relaxation Sounder Onboard Cluster: A Powerful Tool for Space Plasma Diagnosis around the Earth, Cosmic Research, 41, (4), 369–372, 2003.

Tsyganenko, N. A. and Stern, D. P.: Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems, J. Geophys. Res., 101, 27 187–27 198, 1996.

3 Article 3

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., et André, M.

Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations

Ann. Geophys., 24, 1737-1758, 2006a

Ann. Geophys., 24, 1737–1758, 2006
www.ann-geophys.net/24/1737/2006/
© European Geosciences Union 2006

Annales Geophysicae

Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations

F. Darrouzet[1], J. De Keyser[1], P. M. E. Décréau[2], D. L. Gallagher[3], V. Pierrard[1], J. F. Lemaire[1,4], B. R. Sandel[5], I. Dandouras[6], H. Matsui[7], M. Dunlop[8], J. Cabrera[4], A. Masson[9], P. Canu[10], J. G. Trotignon[2], J. L. Rauch[2], and M. André[11]

[1]Belgian Institute for Space Aeronomy (IASB-BIRA), Brussels, Belgium
[2]Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE), CNRS and University of Orléans, Orléans, France
[3]Marshall Space Flight Center (MSFC), NASA, Huntsville, Alabama, USA
[4]Center for Space Radiation (CSR), Louvain la Neuve, Belgium
[5]Lunar and Planetary Laboratory (LPL), University of Arizona, Tucson, Arizona, USA
[6]Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (CESR), CNRS, Toulouse, France
[7]Space Science Center (SSC), University of New Hampshire, Durham, New Hampshire, USA
[8]Space Sciences Division (SSTD), Rutherford Appleton Laboratory (RAL), Chilton, Didcot, Oxfordshire, UK
[9]Research and Scientific Support Department (RSSD), ESTEC-ESA, Noordwijk, The Netherlands
[10]Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP), CNRS, Vélizy, France
[11]Swedish Institute of Space Physics (IRFU), Uppsala division, Uppsala, Sweden

Received: 20 October 2005 – Revised: 27 March 2006 – Accepted: 23 May 2006 – Published: 3 July 2006

Abstract. Plasmaspheric plumes have been routinely observed by CLUSTER and IMAGE. The CLUSTER mission provides high time resolution four-point measurements of the plasmasphere near perigee. Total electron density profiles have been derived from the electron plasma frequency identified by the WHISPER sounder supplemented, in-between soundings, by relative variations of the spacecraft potential measured by the electric field instrument EFW; ion velocity is also measured onboard these satellites. The EUV imager onboard the IMAGE spacecraft provides global images of the plasmasphere with a spatial resolution of 0.1 R_E every 10 min; such images acquired near apogee from high above the pole show the geometry of plasmaspheric plumes, their evolution and motion. We present coordinated observations of three plume events and compare CLUSTER in-situ data with global images of the plasmasphere obtained by IMAGE. In particular, we study the geometry and the orientation of plasmaspheric plumes by using four-point analysis methods. We compare several aspects of plume motion as determined by different methods: (i) inner and outer plume boundary velocity calculated from time delays of this boundary as observed by the wave experiment WHISPER on the four spacecraft, (ii) drift velocity measured by the electron drift instrument EDI onboard CLUSTER and (iii) global velocity determined from successive EUV images. These different techniques consistently indicate that plasmaspheric plumes rotate around the Earth, with their foot fully co-rotating, but with their tip rotating slower and moving farther out.

Keywords. Magnetospheric physics (Magnetospheric configuration and dynamics; Plasmasphere; Instruments and techniques)

Correspondence to: F. Darrouzet
(fabien.darrouzet@oma.be)

1 Introduction

The plasmasphere is a toroidal region located in the Earth's magnetosphere. It is populated by cold and dense plasma of ionospheric origin. It has been investigated by satellites and ground-based instruments (see the monograph by Lemaire and Gringauz, 1998, the references cited therein, and the review by Ganguli et al., 2000). Large-scale density structures have been observed close to the outer boundary of the plasmasphere, which is called the "plasmapause" or the "Plasmasphere Boundary Layer", or PLS (Carpenter, 2004; Carpenter and Lemaire, 2004). These structures are usually connected to the main body of the plasmasphere, and extend outward. They have been called in the past "plasmaspheric tails" (Taylor et al., 1971), or, perhaps also, "detached plasma elements" (Chappell, 1974), but are now known as "plasmaspheric plumes" (e.g. Elphic et al., 1996; Ober et al., 1997; Sandel et al., 2001). Such plumes have been commonly detected by in-situ and ground-based instruments (e.g. Chappell et al., 1970; Carpenter et al., 1992; Foster et al., 2002; Moldwin et al., 2004). More recently, plumes

Published by Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union.

have been routinely observed in global plasmaspheric images made by the Extreme Ultraviolet (EUV) imager onboard the NASA IMAGE spacecraft, sometimes compared with in-situ observations (Sandel et al., 2001, 2003; Garcia et al., 2003; Goldstein et al., 2004; Goldstein and Sandel, 2005; Spasojević et al., 2003, 2004). Plumes have also been identified in in-situ measurements of the ESA/NASA 4-spacecraft CLUSTER mission (Darrouzet et al., 2004; Décréau et al., 2004, 2005; Dandouras et al., 2005).

The formation of these plumes has been predicted on the basis of different theoretical models. Owing to the changes in the convection electric field, according to the geomagnetic activity index K_p, the plasmasphere is deformed, and parcels of plasmaspheric plasma move from the main plasmasphere towards its outer layers (Grebowsky, 1970; Chen and Wolf, 1972; Chen and Grebowsky, 1974). This has been confirmed by numerical simulations (Weiss et al., 1997). Goldstein et al. (2003a) show the importance of the evening convection enhancement associated with SAPS (Sub-Auroral Polarization Stream). The interchange instability could also play a role in the formation of plumes (Lemaire, 2000, 2001; Pierrard and Lemaire, 2004; Pierrard and Cabrera, 2005).

The purpose of this paper is to report plasmaspheric plume observations by CLUSTER. These observations are compared with global images made by IMAGE and in-situ observations by the LANL geosynchronous satellites. After presenting the instrumentation and the methods of analysis in Sect. 2, three case studies are discussed in Sect. 3. Section 4 contains a summary and conclusions.

2 Instrumentation and methods of analysis

2.1 CLUSTER mission

The four CLUSTER spacecraft (C1, C2, C3 and C4) have flown since summer 2000 in a tetrahedral configuration along similar polar orbits with a perigee of about 4 R_E (Escoubet et al., 1997). This allows CLUSTER to cross the plasmasphere from the Southern to the Northern Hemisphere every 57 h, but the spacecraft are not penetrating deeply inside this region due to the high perigee altitude. Each CLUSTER satellite contains 11 identical instruments. Data obtained from 5 of them will be used in this paper: the electron density determined by combining data from two experiments, the Waves of HIgh frequency and Sounder for Probing Electron density by Relaxation, WHISPER (Décréau et al., 1997, 2001) and the Electric Field and Wave experiment, EFW (Gustafsson et al., 2001) (note that the electron spectrometer is usually not operating inside the plasmasphere); the ion density evaluated by the Cluster Ion Spectrometry experiment, CIS (Rème et al., 2001); the drift velocity determined by the Electron Drift Instrument, EDI (Paschmann et al., 2001); and the magnetic field measured by the FluxGate Magnetometer, FGM (Balogh et al., 2001).

The WHISPER instrument can unambiguously identify the electron plasma frequency F_{pe} (related to the electron density N_e by: $F_{pe}\{\text{kHz}\}\sim 9\ [N_e\{\text{cm}^{-3}\}]^{1/2}$). In active mode, the sounder analyses the pattern of resonances triggered in the medium by a radio pulse. This allows the identification of F_{pe} (Trotignon et al., 2001, 2003). In passive mode, the receiver monitors the natural plasma emissions in the frequency band 2–80 kHz. Various signatures lead to an independent estimation of F_{pe} deduced from local wave cut-off properties (Canu et al., 2001).

The EFW experiment measures the spacecraft potential V_{sc}, which is the potential difference between the antenna probes and the spacecraft body. Using a non-linear empirical relation, which depends on the plasma regime, N_e can be estimated from V_{sc} (Pedersen, 1995; Laakso and Pedersen, 1998; Moullard et al., 2002). For a given CLUSTER perigee pass, the EFW measurements can be calibrated using the WHISPER instruments, which give absolutely calibrated values of the electron density (Pedersen et al., 2001). This calibration works well in the plasmasphere. It is, however, only possible in regions where the electron plasma frequency is below the WHISPER limit of 80 kHz, i.e, where the electron density is below 80 cm^{-3}.

In order to facilitate inter-comparison of the four CLUSTER density profiles and comparison with projected data from IMAGE, we choose to plot the density values as a function of the equatorial distance R_{equat} (in units of Earth radii): this is the geocentric distance of the magnetic field line on which the spacecraft is located, measured at the geomagnetic equator, which is identified as the location along the field line where the magnetic field strength reaches a minimum. A magnetic field model is used that combines the internal magnetic field model IGRF2000 and the external magnetic field model Tsyganenko-96 depending on the solar wind pressure, the Disturbance storm-time index (*Dst*) and the Interplanetary Magnetic Field (IMF) Y and Z components (Tsyganenko and Stern, 1996). These models are computed with the UNILIB library (Library of routines for magnetospheric applications; http://www.oma.be/NEEDLE/unilib.php/20x/). We prefer to use R_{equat} instead of the McIlwain L parameter (McIlwain, 1961) because L varies along a magnetic field line, except for a pure dipole, whereas R_{equat} is constant along a field line by definition. Measurements made at the same R_{equat} and local time therefore refer to the same magnetic flux tube.

The CIS experiment consists of two complementary spectrometers, the Hot Ion Analyser (HIA) and the COmposition and DIstribution Function analyzer (CODIF). This last sensor measures the complete 3-D distribution functions of the major ion species (H^+, He^+, He^{++} and O^+) inside the plasmasphere with a time resolution of one spacecraft spin period (4 s), from which partial densities and H^+ velocities can be computed. In addition CODIF contains in the aperture system an additional Retarding Potential Analyser (RPA) device with pre-acceleration for energies between 0.7 and 25 eV/q,

with respect to the spacecraft potential. CODIF works in this RPA mode on C1, C3, and C4.

The EDI experiment measures the drift velocity of artificially injected electron beams. Two beams are emitted in opposite directions perpendicular to the magnetic field, and return to their associated detectors after one or more gyrations. The drift velocity is derived from the directions of the received beams and from the difference in their times-of-flight. This instrument works on C1, C2, and C3. The data used in this study have been cleaned and smoothed as described by Matsui et al. (2003, 2004).

The FGM instrument consists of two tri-axial fluxgate magnetometers and an on-board data-processing unit. It provides high time resolution (22.4 Hz in normal mode) magnetic field measurements from all four spacecraft with an accuracy of at least 0.1 nT. The data have been time-averaged to a resolution of 4 s.

2.2 IMAGE mission and LANL satellites

The IMAGE (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration) spacecraft was launched in March 2000 into a polar orbit with a perigee of 7400 km and an apogee of 8.2 R_E (Burch, 2000). The Extreme Ultraviolet (EUV) imager onboard IMAGE provides global images of the plasmasphere (Sandel et al., 2000). It is an imaging system composed of three cameras, which detect the 30.4 nm sunlight resonantly scattered by the He^+ ions in the plasmasphere. It provides a global image of the plasmasphere every 10 min with a spatial resolution of 0.1 R_E. Thanks to IMAGE's high apogee and EUV's wide field of view, these images show the structure of the entire plasmasphere. Sequences of such 2-D images show the evolution and motion of plasmaspheric plumes over time. The azimuthal and radial velocity of different parts of a plume (the foot or the tip for example) can be quantified from a comparison of the position of plume elements between successive images.

For better comparison with CLUSTER data, the EUV images have been projected onto the dipole magnetic equatorial plane, by assigning to each pixel the minimum dipole L-shell along the line-of-sight (Roelof and Skinner, 2000; Goldstein et al., 2003b; Gallagher et al., 2005). L-based mapping has been chosen as EUV images show the plasmasphere close to Earth, where the dipole magnetic field can be used (for low to moderate geomagnetic activity). The mapped signal is then converted to column abundance using estimates for the solar flux at 30.4 nm, based on the SOLAR2000 empirical solar irradiance model (Tobiska et al., 2000). Finally, the column abundance is converted to pseudo-density by dividing by an estimate of the distance along the line-of-sight that contributes most to the image intensity at each location in the field of view (for more details, see Gallagher et al., 2005). Therefore the EUV images shown in this paper give an equatorial distribution of He^+ pseudo-density versus L and Magnetic Local Time (MLT). The lower sensitivity threshold of the EUV instrument has been estimated to be 4–8 He^+ ions cm^{-3}, or 40 ± 10 H^+ electrons cm^{-3} if assuming a ratio He^+/H^+ around 0.1–0.2 (Goldstein et al., 2003b).

The EUV images have been reprocessed to filter away the noise (apparent as high frequency spatial variations in the image) based on the fact that small scale density distribution in the plasmasphere is not accessible to the instrument, due to its intrinsic resolution and because emission intensities in the EUV images are line-of-sight integration. To increase the signal/noise ratio, we have binned the images (2×2 bins) and subsequently smoothed them (low band pass spatial filter). Finally, we have used histogram equalization and an appropriate colour scale to improve the contrast of the images.

The Magnetospheric Plasma Analyser (MPA) instruments onboard the Los Alamos National Laboratory (LANL) geosynchronous satellites measure the ion density in the range 1–130 eV/q (Bame et al., 1993). This energy range does not cover the coldest fraction of the plasmaspheric distribution, as for the CIS instrument onboard the CLUSTER satellites. However, as the spacecraft potential is typically slightly negative in the dense plasmaspheric plasma, the full ion distribution is slightly accelerated into the instrument. Then the energy resolution is not quite adequate to resolve the distribution well, but nothing is hidden by the potential.

2.3 Spatial gradient

We compute the spatial gradient of different scalar quantities along the trajectory of the centre of mass of the CLUSTER tetrahedron. The method described by Harvey (1998) and Darrouzet et al. (2006) is used. The gradient is determined from simultaneous measurements of a given scalar quantity, with the hypothesis that all four spacecraft are embedded in the same structure at the same time. The three events presented in this paper are small spacecraft separation cases, prone to meet this constraint of quasi-homogeneity in space. This tool can be applied in particular to the electron density and to the magnetic field components. However, it crucially depends on the inter-spacecraft separation, the time resolution and the measurement accuracy on all four spacecraft. The limitations of this technique are discussed by Darrouzet et al. (2006).

2.4 Velocities

To study the motion of plasmaspheric plumes with CLUSTER, we use velocities determined from different techniques. The H^+ velocity $\boldsymbol{V}_H$ can in principle be determined from the ion distribution functions measured with the CIS/CODIF instrument. The accuracy of the velocity measurements in the plumes is limited by low particle counts (due to the low density in the plumes) and is further influenced by spacecraft charging (outside the main plasmasphere the spacecraft potential can become strongly positive) and the finite energy

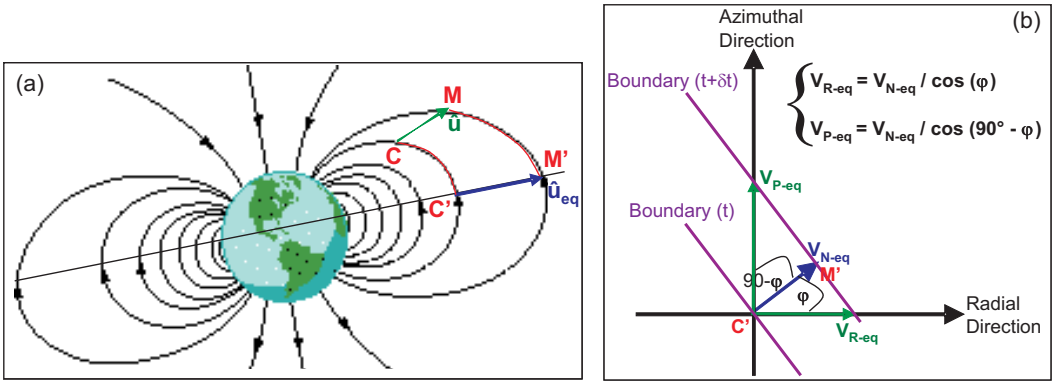

Fig. 1. (a) Projection along the magnetic field line of a vector $\boldsymbol{u}$ determined at the centre of mass C of the four satellites, until the magnetic field strength reaches a minimum (C′): $\boldsymbol{u}_{eq}$. **(b)** Definition of three velocity vectors in the equatorial plane: the normal boundary velocity $\boldsymbol{V}_{N-eq}$, the azimuthal plasma velocity $\boldsymbol{V}_{P-eq}$ and the apparent radial boundary velocity $\boldsymbol{V}_{R-eq}$ (see text for more details).

Table 1. Summary of the different types of velocity.

Measured Velocities:

Acronym (Instrument)	V_D (EDI)	V_E (EUV)	V_C
Name	Electron drift velocity	Global velocity	Co-rotation velocity

Computed Velocities:

Acronym (Instrument)	V_N (WHISPER)	V_P (WHISPER)	V_R (WHISPER)	V_{IO} (WHISPER)
Name	Normal boundary velocity	Azimuthal plasma velocity	Apparent radial boundary velocity	Average radial velocity between inbound and outbound structure
Assumption	Same structure crossed in the same time by the four satellites	Azimuthal motion only	Azimuthal motion only	Same MLT sector between both structure crossings

range of the instrument. We therefore have not used these velocities.

The electron drift velocity $\boldsymbol{V}_D$ is measured by EDI and is available from each spacecraft on which this instrument is operating.

A four-point technique, called time-delay, is applied to the features (supposed to be locally planar boundaries) identified in the WHISPER electron density profiles at the inner and outer boundary of the plumes. Assuming a boundary to be a planar surface travelling at a constant velocity along its normal, we determine the normal boundary velocity $\boldsymbol{V}_N$ with a time delay method, i.e. from individual spacecraft positions and times of the boundary crossings.

We compute also the co-rotation velocity at the centre of mass of the four CLUSTER spacecraft: $V_C = 2\pi R/(24\times60\times60)$, where R is the distance from the spacecraft to the Earth's rotation axis.

An average radial velocity, V_{IO-eq}, can be computed from the displacement in R_{equat} of a structure between in- and outbound passes, when the spacecraft remains approximately in the same MLT sector.

From IMAGE data, we determine another velocity: the azimuthal and radial motion V_E of geometrically identified parts of the plume as determined from successive EUV images projected onto the dipole magnetic equatorial plane.

2.5 Mapping onto magnetic equatorial plane

We project all the CLUSTER vector measurements (velocities, normals and spatial gradients) onto the magnetic equatorial plane by using the same magnetic field model as in the WHISPER density analysis (IGRF2000 and Tsyganenko-96). If we have a vector $\boldsymbol{u}$ determined at the centre of mass C of the four spacecraft, we consider a small displacement (of the order of a few kilometres) of this point C to M with the velocity $\boldsymbol{u}$. We determine the projection C′ of C along the magnetic field line, until the magnetic field strength reaches a minimum. By doing the same with point M, we determine the velocity $\boldsymbol{u}_{eq}$ in the magnetic equatorial plane. This technique is shown on Fig. 1a (for the simple case of a dipole field). We thus obtain the following velocities: $\boldsymbol{V}_{H-eq}$, $\boldsymbol{V}_{D-eq}$, $\boldsymbol{V}_{N-eq}$, V_{C-eq}, all without any component

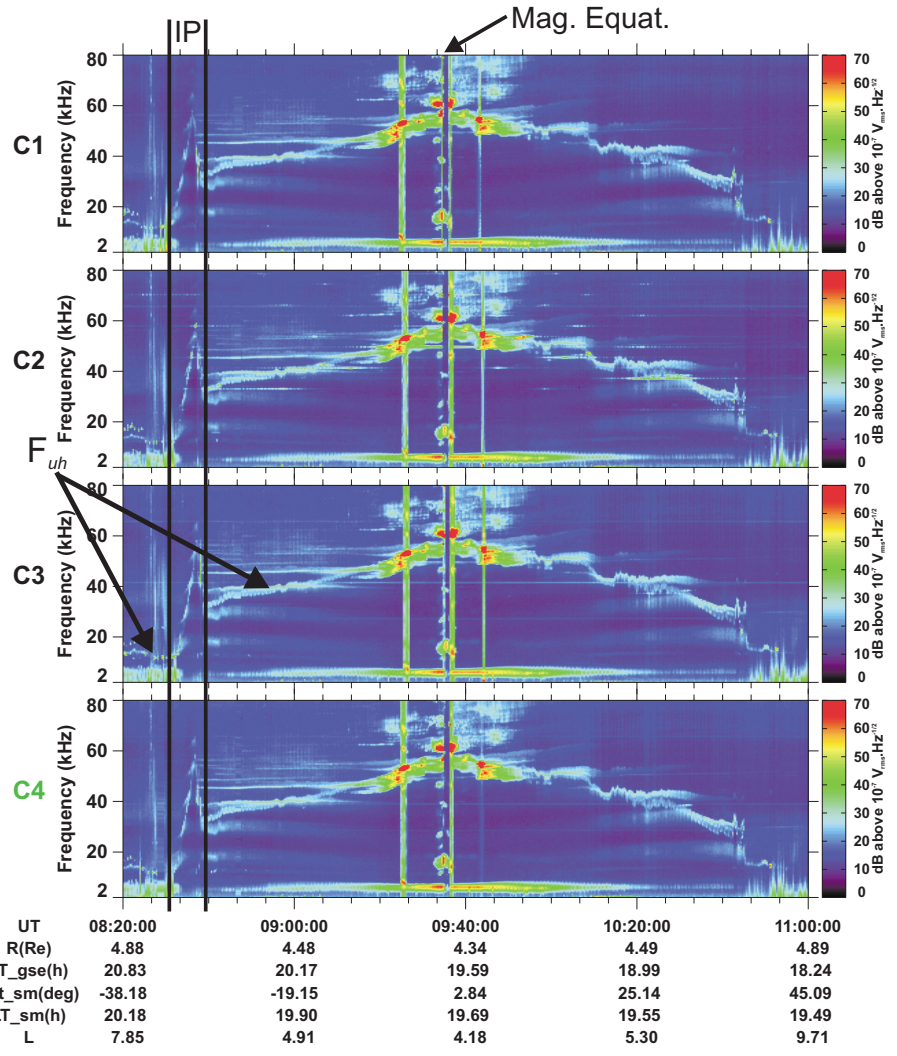

Fig. 2. Frequency-time spectrograms measured on 7 May 2002 by the WHISPER instrument onboard the four CLUSTER spacecraft. The entire plasmasphere crossing is shown, including a plume crossing during the inbound pass (IP) and the magnetic equator (Mag. Equat.) crossed at 09:35 UT. The upper hybrid frequency, F_{uh}, is indicated by the black arrows. The orbital parameters correspond to C4.

in the magnetic field direction. Then we derive the azimuthal and radial components of all those velocities.

Let us assume that the plasma is rotating, i.e. moving in the azimuthal direction only. Figure 1b shows how a boundary frozen into the plasma moves as the plasma rotates, with an azimuthal plasma velocity V_{P-eq}, from its position at time t to its position at time t+δt. If we define the angle ϕ between the normal boundary velocity and the radial direction, this motion implies that V_{N-eq}=V_{P-eq} sinϕ, which is the normal boundary velocity we actually measure. The azimuthal plasma velocity V_{P-eq} can then be deduced and compared to the full co-rotation speed V_{C-eq}. The apparent radial boundary velocity, V_{R-eq}, corresponding to the apparent radial motion of the boundary when observed at fixed MLT, is: V_{R-eq}=V$_{N-eq}$ / cosϕ (see panel (b) of Fig. 1). All those velocities are summarized in Table 1.

3 Observations

3.1 First event: 7 May 2002

3.1.1 CLUSTER observations

This plasmasphere crossing is located around 20:00 MLT on 7 May 2002 and with a maximum value of K_p in the previous 24 h equal to 3. The CLUSTER spacecraft separation distance is small (around 150 km). Figure 2 displays frequency-time spectrograms from the four WHISPER instruments during the entire plasmasphere crossing. The magnetic equator is crossed by all four spacecraft at almost the same time, around 09:35 UT, as indicated by the presence of intense monochromatic electrostatic wave emissions. The upper hybrid frequency, F_{uh} increases from 15 kHz to 50–60 kHz during the inbound part of the crossing and decreases down to

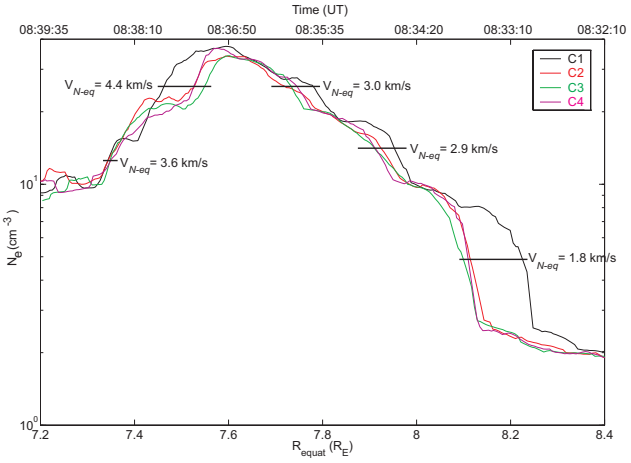

Fig. 3. Electron density profiles for the four CLUSTER satellites as a function of $R_{\rm equat}$ across the plume observed on 7 May 2002 (time indicated as reference). The magnitude of the normal boundary velocity vectors $\boldsymbol{V}_{N-eq}$ derived from the time delays at different times during the crossing and projected onto the magnetic equatorial plane is indicated on the figure.

15 kHz again during the outbound part. This quantity, associated with the electron gyro-frequency, F_{ce} detected by the sounder, allows the determination of the electron plasma frequency, F_{pe}, through the relation: F_{pe}=$(F_{uh}^2$–$F_{ce}^2)^{1/2}$, and therefore the electron density N_e. The spacecraft cross the plasmasphere, but they are not going deeply inside this region, as confirmed by the rather low maximum value of F_{pe} (the maximum of 60 kHz corresponds to an electron density of only 45 $\rm cm^{-3}$). A density structure is observed in the inbound pass by all satellites around 08:35 UT. IMAGE data presented in the following section will confirm that this structure is a plasmaspheric plume (labelled IP on the figure, for "inbound plume"). A small increase in the plasma frequency is also seen during the outbound crossing around 10:45 UT.

The electron density profiles as a function of time look very similar, thus the assumption of a locally planar surface used in four-point methods is justified in this case. However, on the profiles shown as a function of $R_{\rm equat}$ for the inbound plume crossing in Fig. 3, C1 observes the outer region of the plume a bit further outward. The differences could come from the different latitudes of the spacecraft (which could explain systematic difference in density) and the outward motion of the density structure during the time interval (C1 crosses the plume about 1 min ahead of the 3 other spacecraft). Moreover, the satellites do not cross this structure in exactly the same MLT sector, which can explain such a shift if the orientation of the density interface is not perfectly parallel to a magnetic shell. Finally, the order of the plume crossing-times by the four spacecraft is the same in the inner edge and in the outer edge (Fig. 6d). This is consistent with the structure moving gradually with respect to the spacecraft. We use the time delay method to determine the normal velocities of the plume boundaries and the method presented in Sect. 2.5 to determine their projection onto the magnetic equatorial plane. The outer boundary of the plume is moving at V_{N-eq} =2.3±0.5 km/s. The angle ϕ between the normal of the outer boundary (determined from the spatial density gradient direction and from the normal boundary velocity direction) and the radial direction is around 15°. If the plasma would move only azimuthally, this would imply an equatorial azimuthal plasma velocity V_{P-eq}=8.8±2.0 km/s. This is much higher than the co-rotation speed V_{C-eq}=3.7 km/s. The azimuthal speed could be smaller if there would also be some outward plasma motion, e.g. for the outer edge, V_{P-eq}=3.7 km/s and V_{R-eq}=1.3 km/s would also be compatible with V_{N-eq}=2.3 km/s and $\phi \sim 15°$. The inner boundary, around 08:38 UT moves with V_{N-eq}=3.6±0.5 km/s. With $\phi \sim 30°$, this gives V_{P-eq}=7.2±1.0 km/s, which is also higher than V_{C-eq} (3.3 km/s). This suggests that there are deviations from co-rotation, with the outer boundary moving faster than the inner edge.

Figure 4 presents energy-time spectrograms from the CIS instrument in RPA mode, which measures the ion distribution in the energy band 0.7–25 eV/q with respect to the spacecraft potential (usually between 1 and 2 eV in the plasmasphere). Panels (a), (b) and (c) are respectively for H^+, He^+ and O^+, and panel (d) is the pitch-angle distribution of H^+. The plume IP is observed between 08:36 and 08:38 UT. It is mainly composed of protons, which have isotropic flux, traces of $He^+$and no detectable O^+ ions. The density values obtained from CIS in the inbound plume are smaller than those from the WHISPER experiment, because the spectrometer does not detect particles below 0.7 eV (with respect to the spacecraft potential), which is the major fraction of the distribution (Dandouras et al., 2005).

The projected electron drift velocity $\boldsymbol{V}_{D-eq}$ from EDI is plotted as a function of time on Fig. 5 for the satellites C1, C2 and C3, during the inner plasmasphere crossing. The azimuthal and radial velocity components, plotted respectively on panels (a) and (b), have a wavy structure during almost all the inner plasmasphere crossing, with a period of about 100 s. Such oscillations are not seen in the density profiles; these non-compressional oscillations could be Alfvén waves. When the spacecraft are inside the plasmasphere, between 09:00 and 10:10 UT (i.e. $R_{\rm equat}$ below $6R_E$), the average drift velocity magnitude is V_{D-eq}=2.1±0.2 km/s, close to the co-rotation velocity V_{C-eq}=2.2±0.2 km/s, and its direction is also essentially azimuthal. Between this region and the plume (08:40–09:00 UT), the plasma is moving in the anti co-rotation direction, which is not surprising at such distance from the Earth (6–7 R_E), where the co-rotation electric field has less influence. These results confirm that the inner plasmasphere is mainly in co-rotation around the Earth.

Figure 6 shows a zoom on the plume crossing time interval, with EDI drift velocities on panels (a), (b), (c) and WHISPER electron density displayed on panel (d). For the outer part of the plume (between 08:32 UT and 08:37 UT),

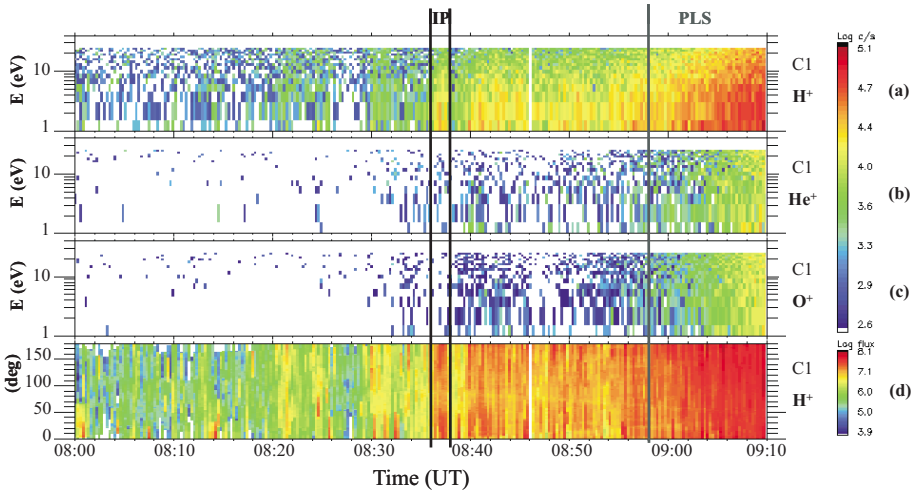

Fig. 4. Energy-time spectrograms from the CIS instrument in RPA mode on 7 May 2002 during the inbound crossing by C1 (IP means "Inbound Plume"; PLS means "Plasmasphere"). Panels **(a)**, **(b)** and **(c)** are for H^+, He^+ and O^+ ions respectively, and panel **(d)** is the pitch-angle distribution of H^+.

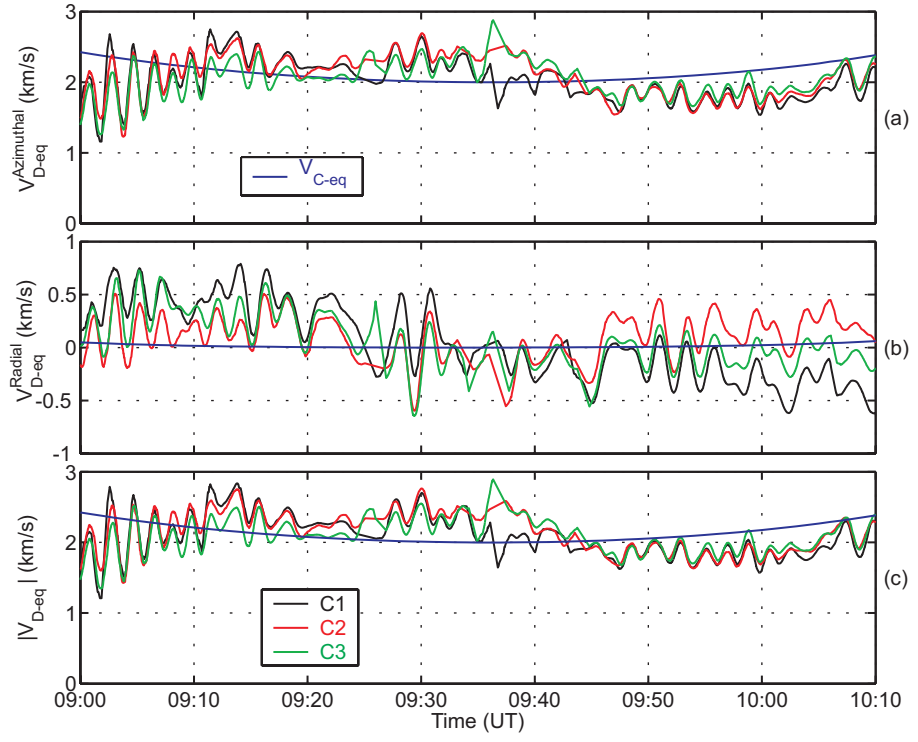

Fig. 5. Electron drift velocity $\boldsymbol{V}_{D-eq}$ measured by EDI and projected onto the magnetic equatorial plane plotted in azimuthal **(a)**, radial **(b)** and magnitude **(c)** coordinates as a function of time for C1, C2 and C3 during the plasmasphere crossing of 7 May 2002, with the co-rotation velocity $\boldsymbol{V}_{C-eq}$ also projected onto the same plane (blue lines).

$\boldsymbol{V}_{D-eq}$ is azimuthal and radial (∼2.5 km/s) with an average magnitude much higher than the co-rotation speed (V_{D-eq}=8.5±1.0 km/s whereas V_{C-eq}=3.8–3.4 km/s). However, in the density gradient of the plume closest to the plasmasphere (between 08:37 and 08:39 UT), the drift velocity is closer to the co-rotation velocity, in terms of direction and magnitude.

By looking at the magnetic field $\boldsymbol{B}$ measured by the FGM experiment (shown on panels (e)–(h) of Fig. 6), we observe variations in magnetic field orientation during the plume

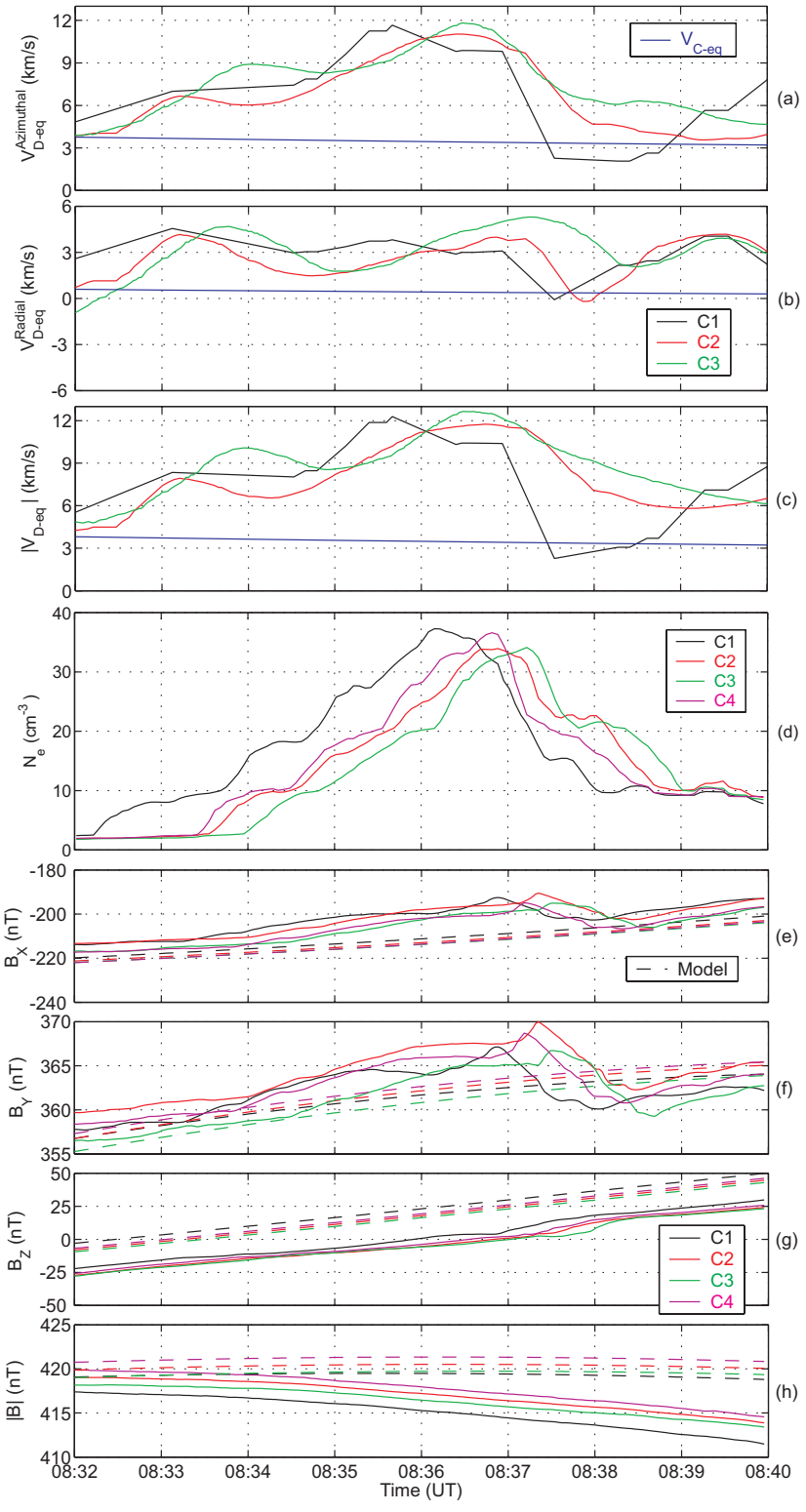

Fig. 6. Different quantities plotted as a function of time during the inbound plume crossing of 7 May 2002: **(a)–(c)** electron drift velocity measured by EDI and projected onto the magnetic equatorial plane (similar as Fig. 5); **(d)** electron density determined by WHISPER; **(e)–(h)** magnetic field components and magnitude in the GSE coordinate system measured by FGM (in solid lines) and determined from IGRF2000 and Tsyganenko-96 models (in dotted lines).

crossing, but no variation in magnitude. There is a gradual rotation of $\boldsymbol{B}$ of about 5° up to the time of the maximum density of the plume (08:34–08:37 UT), and then $\boldsymbol{B}$ turns back rapidly to its original orientation (08:37–08:39 UT).

3.1.2 IMAGE and LANL observations

Figure 7 shows an EUV image of the plasmasphere at 08:31 UT on 7 May 2002 (around the time of the inbound crossing of the plume by CLUSTER). This image is a full frame image, reduced to the region of interest, and projected onto the dipole magnetic equatorial plane using the method described in Sect. 2.2. The Sun is toward the right in this picture and the size and location of the Earth are indicated by the white disk in the centre of the image; the Earth's shadow extends through the plasmasphere in the anti-sunward direction. The CLUSTER spacecraft are located at 20:00 MLT, in the top-left corner of the image. The two white lines correspond to the limit between the three EUV cameras, where the density level could be decreased or increased by this artefact.

A thin but extended plume is observed on this EUV image, from the evening sector (20:00 MLT) to the post-midnight sector (01:00 MLT). The plume is not very clearly seen on the figure, because of its level of density (maximum value of 40 cm^{-3} from WHISPER) close to the EUV threshold (40±10 electrons cm^{-3}), but by looking at image sequences, we can clearly see the global shape of the plume. The EUV image shows that the centre of the plume extends from 5.5 R_E at its foot to 7.7 R_E at its tip, and that its transverse size has a maximum extent of about 0.7 R_E. At 08:31 UT and 20:00 MLT, it is located between 7.0 and 7.7 R_E in the line-of-sight integrated images, which is consistent with the plume observed by WHISPER between 08:32 and 08:40 UT at 20:00 MLT with R_{equat} between 7.3 and 8.2 R_E. Between 18:00 and 20:00 MLT, the plasmapause is located between 4 and 3.7 R_E on the EUV image. From CLUSTER data, it is difficult to distinguish the plasmapause, as the spacecraft does not completely enter the plasmasphere, but we could at least say that around 20:00 MLT the plasmapause is at a distance less than 4.2 R_E.

The plume is observed on EUV images for the first time around 04:00 UT, with its foot attached to the plasmasphere around 20:00 MLT. It is visible until 10:00 UT, at which time the foot is located around 01:30 MLT. Before and after this time interval, EUV images are not of sufficient quality, or IMAGE is too close to the Earth to view the entire plasmasphere. These values give an approximate motion of the foot of the plume (at 4 R_E) of the order of the co-rotation velocity V_{C-eq}=1.9 km/s there. However, with the same kind of analysis near the tip of the plume, between 07:20 and 09:20 UT, we find a velocity of the order of half the co-rotation velocity, with a slight increase in radial distance of the order of 0.3 R_E over this period of time (i.e. outward speed of ∼0.3 km/s). This means that the plume is rotating around the Earth, with its foot attached to the main plasmasphere where it is co-rotating, but with its tip rotating more slowly and moving farther away from the Earth. This is consistent with the results obtained with the CLUSTER velocities described in the previous section, and with earlier studies of plasmaspheric plumes (Spasojević et al., 2003; Darrouzet et al., 2004).

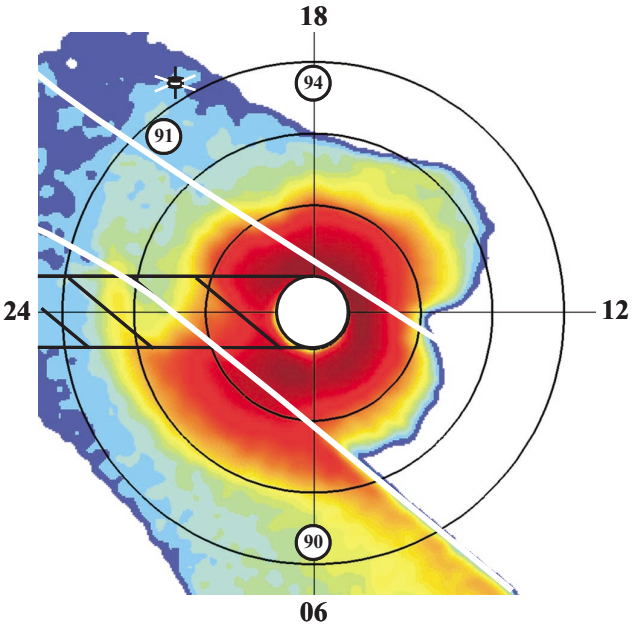

Fig. 7. Projection of a full-frame EUV image onto the equatorial plane at 08:31 UT on 7 May 2002. The white disk in the centre of the image corresponds to the size and position of the Earth, with its shadow extending away from the Sun. The three large circles correspond to R_{equat}=3, 5 and 7 R_E. The two white lines correspond to the limits between the three EUV cameras. The position of the CLUSTER satellites is indicated on the EUV image, as well as the positions of three geosynchronous satellites: LANL 1990-095, LANL 1991-080 and LANL 1994-084.

The geosynchronous satellites LANL 1991-080 and LANL 1994-084 observe an increase of ion density in the same region as CLUSTER and IMAGE: LANL 1991-080 records up to 35 cm^{-3} around 09:00–09:30 UT at 22:00 MLT and LANL 1994-084 up to 35 cm^{-3} around 11:00–11:15 UT at 21:00 MLT. LANL 1990-095, located around 06:00 MLT at 08:30 UT, does not observe any density structure (the positions of the three spacecraft are indicated on Fig. 7). These observations confirm the presence of a narrow plume with a low density maximum, around 7 R_E, in the pre-midnight MLT sector.

3.2 Second event: 2 June 2002

3.2.1 CLUSTER observations

This second event is observed with small spacecraft separation (around 150 km), in the dusk sector (18:00 MLT), and when the geomagnetic activity had a peak value of K_p=4

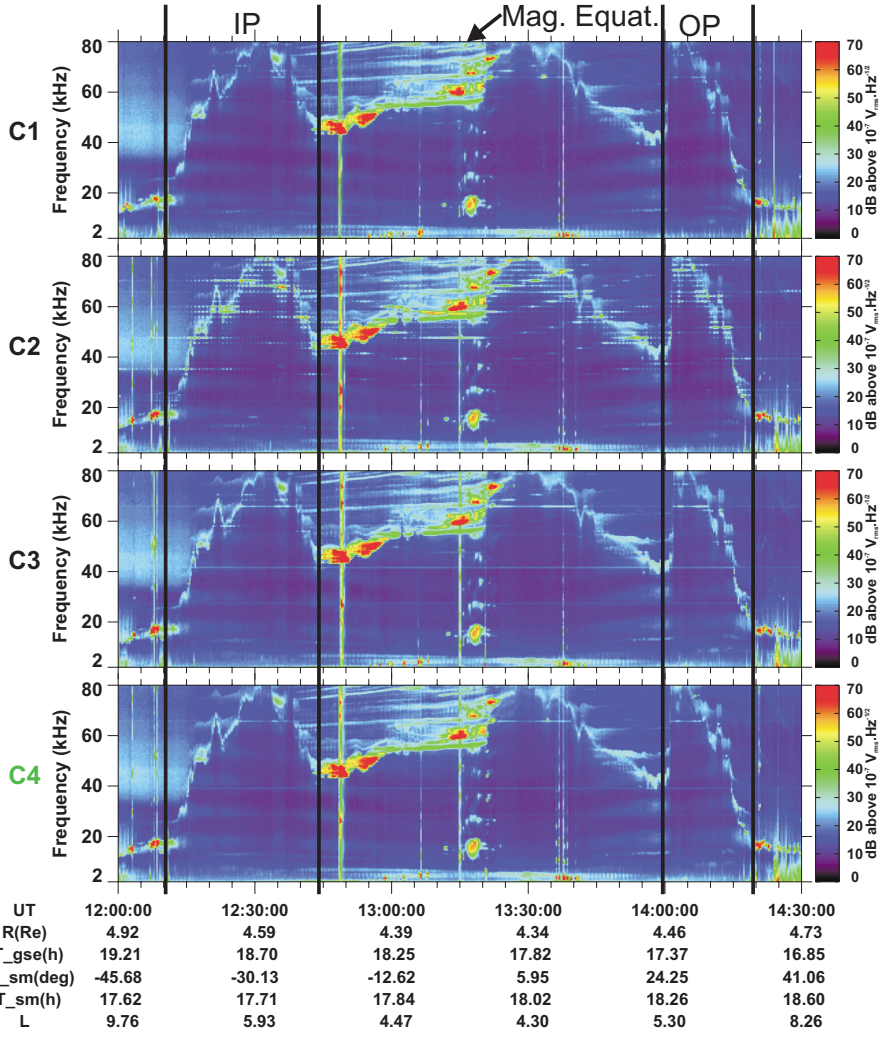

Fig. 8. Frequency-time spectrograms measured by the four CLUSTER/WHISPER instruments on 2 June 2002, showing the entire plasmasphere crossing, including plume traversals in the inbound (IP) and outbound passes (OP) and the magnetic equator (Mag. Equat.) crossed around 13:20 UT. The orbital parameters correspond to C4.

in the previous 24 h. Figure 8 displays WHISPER spectrograms. The magnetic equator is crossed around 13:20 UT. A very wide plume is seen in the inbound (IP) and outbound passes (OP) on all four spacecraft; the IP lasts more than 30 min. The plume crossings are almost identical on the four satellites (see for example, the small structure inside IP at 12:20 UT, and an OP structure at 14:10 UT). This plume has a high maximum F_{pe}, slightly above 80 kHz.

The electron density profiles of the plume as determined from WHISPER and EFW (for the part above 80 cm^{-3}) are shown in Fig. 9. Both structures have the same overall shape. This indicates that these are crossings of the same plume at Southern and Northern latitudes of the plasmasphere. The similarity of the profiles between IP and OP suggests that the plume has not moved much over the 2 h between IP and OP. This is confirmed by the equatorial normal boundary velocities V_{N-eq} derived from the time profiles and shown on Fig. 9. These velocities are quite small for the inbound plume crossing (larger at the outer edge than at the inner one). The angle ϕ between the normal of the outer boundary of the inbound crossing and the radial direction (determined from the spatial density gradient direction and from the normal boundary velocity direction) is around 10°, V_{N-eq}=1.2±0.7 km/s, and then V_{P-eq}=6.9±1.2 km/s with the assumption that the velocity is azimuthal without any radial component. This is much higher than the co-rotation velocity, V_{C-eq}, which is between 3.6 and 2.8 km/s at these spacecraft positions. This could be also compatible with a lower azimuthal speed if there is an outward plasma motion as well. At the inner edge, $\phi \sim 10°$, V_{N-eq}=0.7 ± 0.2 km/s, and thus V_{P-eq}=4.0±1.2 km/s, also higher than V_{C-eq}. For the outbound crossing, the boundary velocities are very different

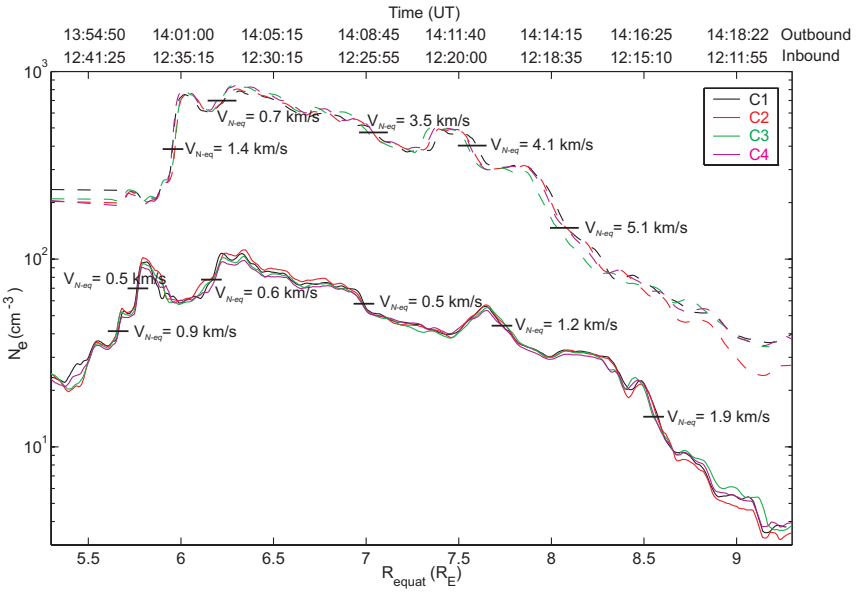

Fig. 9. Electron density profiles as a function of R_{equat} for the two plume crossings on 2 June 2002 (time indicated as reference). The lower four curves correspond to the inbound pass and the upper four curves (shifted by a factor 10) to the outbound pass by the four CLUSTER satellites. The magnitude of the normal boundary velocity $\boldsymbol{V}_{N-eq}$ derived from the time delays of different features during both plume crossings and projected onto the magnetic equatorial plane is indicated on the figure.

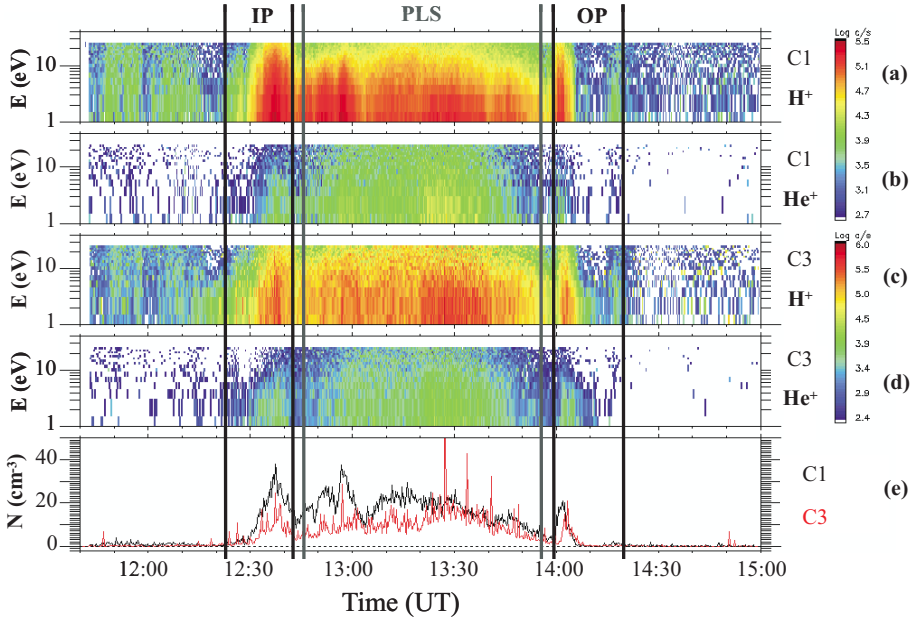

Fig. 10. Data from the CIS instrument in RPA mode on 2 June 2002 during the plasmasphere crossing of C1 and C3. Panels **(a)** and **(b)** show the distribution of H^+ and He^+ for C1, whereas the same data for C3 are shown on panels **(c)** and **(d)**. Panel **(e)** shows H^+ density for C1 (black) and C3 (red).

between both edges of the plume: for the outer edge, V_{N-eq}=4.2±0.8 km/s, ϕ∼30°, then V_{P-eq}=8.4±1.6 km/s, whereas for the inner edge, V_{N-eq}=1.1±0.3 km/s, $\phi \sim 30°$, then V_{P-eq}=2.2±0.6 km/s. As in the preceding event, there are deviations from co-rotation.

Comparing both passes, the inner edge of the plume shifts 0.5 R_E in 75 min, corresponding to V_{IO-eq}=0.7±0.1 km/s. This is comparable to the projected radial boundary velocity, V_{R-eq}, which is 0.7±0.2 km/s for the inbound pass and 1.3±0.2 km/s for the outbound pass. For the outer edge

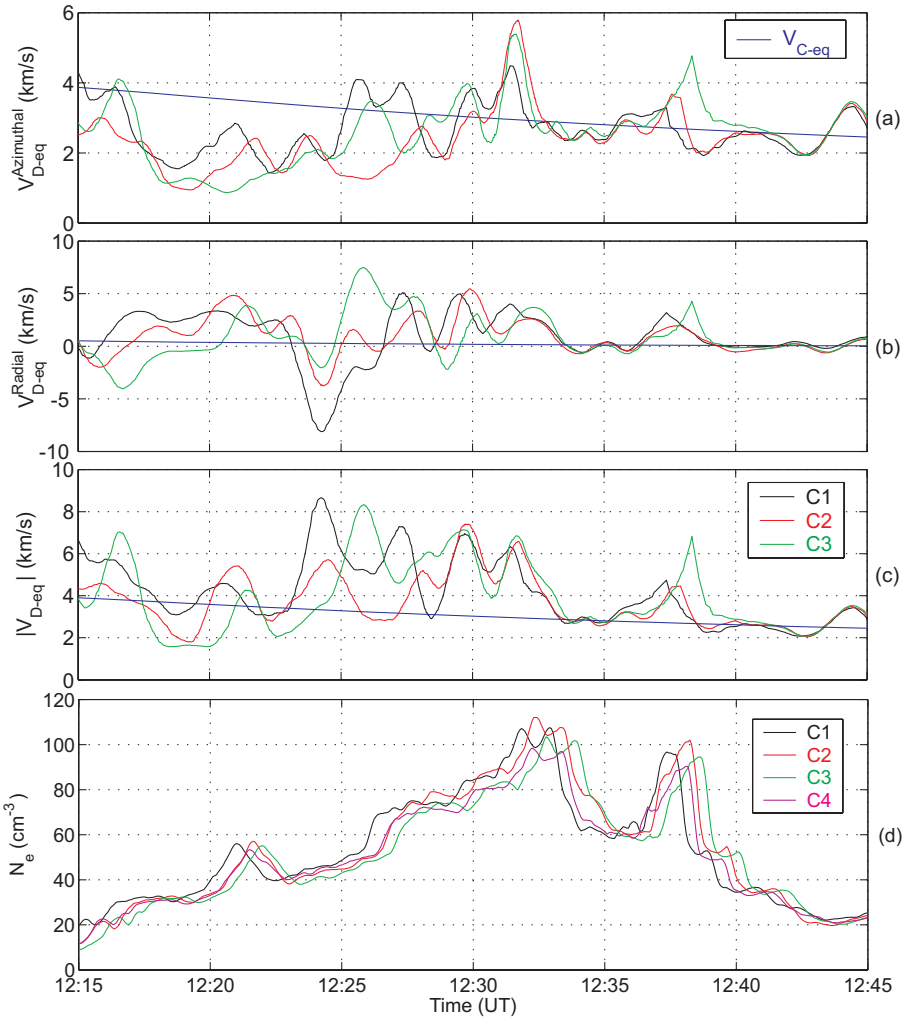

Fig. 11. Different quantities plotted as a function of time during the inbound plume crossing of 2 June 2002: **(a)–(c)** electron drift velocity $\boldsymbol{V}_{D-eq}$ measured by EDI onboard C1, C2 and C3 and projected onto the magnetic equatorial plane; **(d)** electron density determined from WHISPER onboard the four CLUSTER spacecraft (similar as panels (a)–(d) of Fig. 6).

of the plume, we found V_{IO-eq}=0.5±0.1 km/s, whereas the timing analysis gives a value of 1.2±0.2 km/s for the inbound crossing; for the outbound crossing, we obtain V_{R-eq}=4.8±0.5 km/s, which is much higher. These results suggest that the plume is thinner in the outbound crossing in the Northern Hemisphere than in the inbound one in the Southern Hemisphere and that its inner edge is at a larger equatorial distance. They show also that the instantaneous measurements (V_N) are in agreement with long term motion of the plume (V_{IO-eq}).

Data from the CIS instrument in RPA mode (0.7–25 eV/q) are shown in Fig. 10 for C1 and C3. Panels (a)–(b) and (c)–(d) show the energy distribution of H^+ and He^+ for C1 and C3, respectively. Panel (e) plots the ion density for C1 and C3. The CLUSTER spacecraft enter the main plasmasphere at 12:45 UT and exit it at 13:55 UT, as indicated by higher proton density (PLS region). The plumes are clearly seen in the H^+ populations in the inbound crossing (IP) between 12:20 and 12:45 UT, and also in the outbound pass (OP) between 14:00 and 14:20 UT. The outbound plume seems to be divided in two parts, with lower ion densities in between. This density depletion corresponds to the decrease of electron density observed by WHISPER around 14:10 UT ($R_{\text{equat}} \sim 7.2\, R_E$). The plume crossings seem to be shorter in the He^+ spectrograms, because of the low densities in the outer part of the plumes. The density values obtained from CIS/CODIF in the RPA mode are lower than those determined from WHISPER because the limited energy range of the instrument does not cover the whole energy range of the ions (as can be seen in Fig. 10a and c) and because of spacecraft charging.

The drift velocity components determined by EDI are shown on Figs. 11a–c and 12a–c for C1, C2, C3, for the two plume crossings. Around the location of the maximum

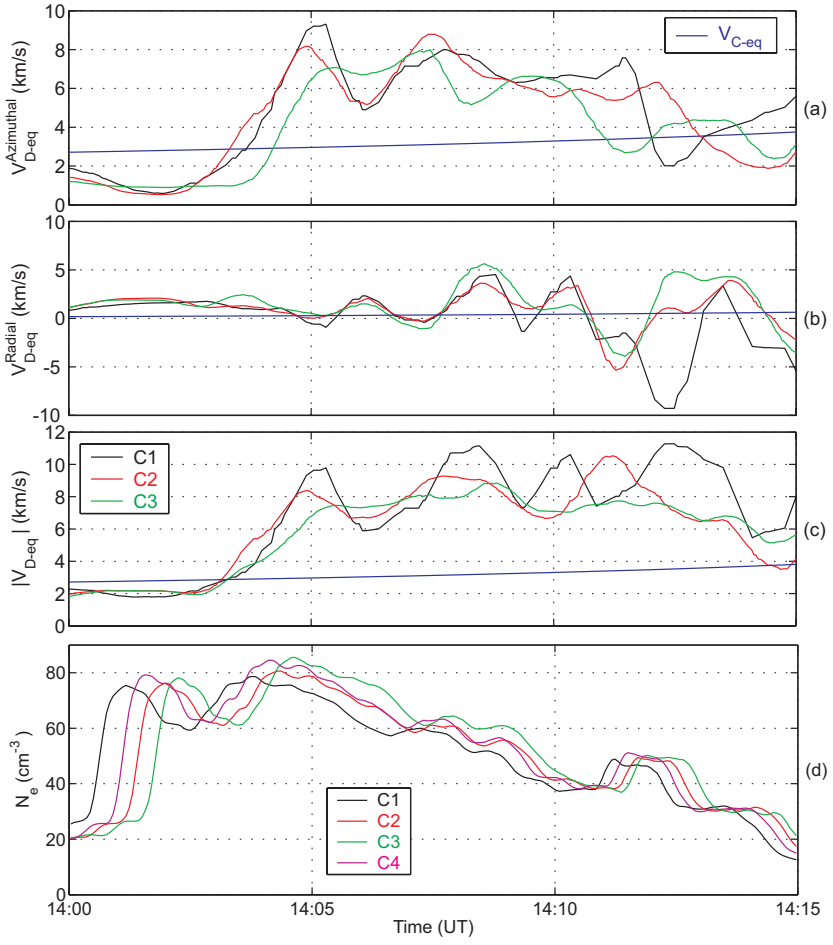

Fig. 12. Similar as Fig. 11 during the outbound plume crossing of 2 June 2002.

density (12:25 to 12:35 UT, and 14:07 to 14:13 UT), the velocity components have a wavy structure, but not as quasi-monochromatic as in the first plume event discussed in Sect. 3.1; the data again suggest that these non-compressional oscillations could be Alfvén waves. During the inbound plume crossing (see Fig. 11), the average equatorially projected electron drift velocity is V_{D-eq}=3.5±1.0 km/s, mainly in the azimuthal direction but with also a radial expansion of the plume (0.9 km/s). This magnitude is of the order of the co-rotation velocity (3.6–2.4 km/s). Concerning the outbound crossing of the plume (see Fig. 12), V_{D-eq}=5.5±1.0 km/s on average, globally in the co-rotation direction, with larger values at the outer edge. This is consistent with the values of the velocity determined from WHISPER in the outbound plume. Inside the plasmasphere (12:50–13:50 UT, R_{equat}=4.4–5.3 R_E), V_{D-eq}=2.0±0.2 km/s, in the co-rotation direction and close to the co-rotation velocity (V_{C-eq}=2.0–2.3 km/s).

For this event, there is no noticeable change in the magnetic field.

3.2.2 IMAGE and LANL observations

Figure 13 presents an EUV image taken at 12:33 UT on 2 June 2002 (around the time of the inbound crossing of the plume by the CLUSTER satellites) and projected onto the dipole magnetic equatorial plane. A very large plume is observed in the post-dusk sector, with its foot attached to the plasmasphere between 17:30 and 22:00 MLT. At 17:30 MLT, it is located between 6.0 and 7.5 R_E, which is consistent with WHISPER, which observes the plumes between 5.5 and 8.5 R_E (but with an electron density above the estimated EUV threshold only between 5.7 and 7.8 R_E).

The plume is observed on EUV images from 10:10 UT until 14:30 UT. These successive images enable us to determine the motion of the plume. The foot of the plume (at 3.7 R_E) moves at V_E=1.6±0.1 km/s, close to the co-rotation velocity V_{C-eq}=1.7 km/s. It is hard to make the same calculation with the tip of the plume, as it is difficult to identify the plume tip unambiguously. However, the tip is clearly moving slower than the foot. The images show that the tip is moving away from the Earth. The CLUSTER measurements also showed

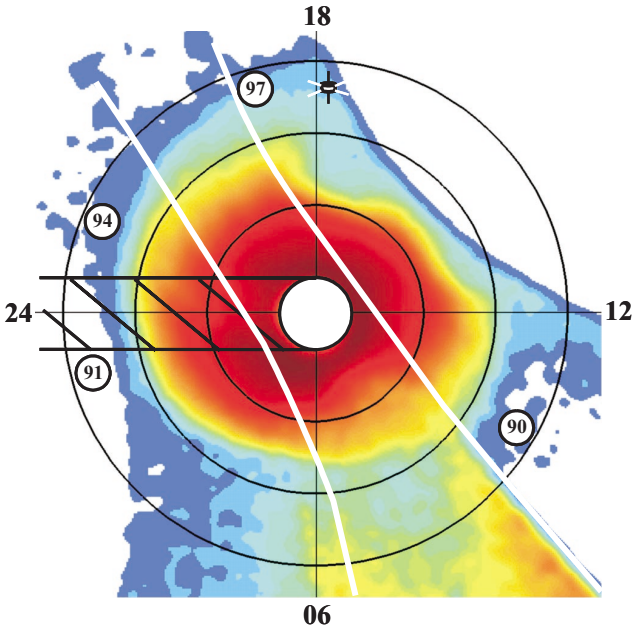

Fig. 13. Projection of a full-frame EUV image onto the equatorial plane at 12:33 UT on 2 June 2002 (similar as Fig. 7, with also the position of LANL 97A).

how the inner edge of the plume moves from R_{equat}=5.6 to 6 R_E between the inbound and outbound passes.

For this event, there is only one geosynchronous satellite (LANL 97A) that observes an increase of the ion density (up to 100 cm^{-3}) at 19:00 MLT and around 12:30 UT; the three others are outside this MLT sector (see the position of LANL 1990-095, LANL 1991-080, LANL 1994-084 and LANL 97A on Fig. 13). The spacecraft observes this large density structure during 10 h as it orbits Earth from 12:00 to 22:00 MLT. This is consistent with the plume seen by IMAGE between 17:30 and 22:00 MLT, also with the high density value determined from CLUSTER (maximum electron density at about 100 cm^{-3}), and with the equatorial distance where CLUSTER observes the plume at 12:30 UT: 6.5 R_E.

3.3 Third event: 11 April 2002

3.3.1 CLUSTER observations

The third event on 11 April 2002 is located in the premidnight sector, between 21:45 and 21:10 MLT, and with a maximum value of K_p in the previous 24 h equal to 3$^-$. The CLUSTER spacecraft separation is around 150 km. As this case has already been discussed by Darrouzet et al. (2004), we will summarize their results and complete them with input from other CLUSTER instruments and full-frame EUV images. Figure 14 displays WHISPER frequency-time spectrograms for the entire plasmasphere crossing. A plume is observed in the inbound (IP) and outbound (OP) passes, but the size and shape of this plume change considerably between both passes.

The electron density profiles given by Darrouzet et al. (2004, Fig. 4) allow the calculation of normal boundary velocities $\boldsymbol{V}_N$. After projection onto the equatorial plane, we find V_{N-eq}=2.1±0.3 km/s and 1.7±0.3 km/s for the outer and inner edge of the inbound crossing respectively, and V_{N-eq}=1.4±0.3 km/s and 1.6±0.3 km/s for the outer and inner edge of the outbound pass respectively. With ϕ∼15–20° for the outer and inner edges of both crossings, the corresponding equatorial azimuthal velocities are V_{P-eq}=8.1±1.2 km/s and 5.0±0.8 km/s for the inbound crossing, and V_{P-eq}=4.1±0.9 km/s and 6.2±1.1 km/s for the outbound one (if the convection velocity would only be azimuthal). The co-rotation speed V_{C-eq} ranges from 3.3 to 2.8 km/s during the inbound crossing, and from 3.1 to 3.6 km/s during the outbound one. This result could be also compatible with a lower azimuthal speed if there is an outward plasma motion as well. The calculation of V_{IO-eq} from the displacement of a structure between the inbound and outbound passes confirms the previous calculations: for the inner edge, V_{IO-eq}=0.7±0.1 km/s, whereas V_{R-eq}=1.7±0.2 km/s, and for the outer edge, V_{IO-eq}=0.4±0.1 km/s, whereas V_{R-eq}=1.8±0.2 km/s. All these results show that the plume is moving outwards.

The CIS data in RPA mode are shown on Fig. 15 for C1 and C3. The format of this figure is the same as in Fig. 10. The plume is clearly detected on both spacecraft in the inbound pass around 04:30 UT (IP), and around 06:20 UT in the outbound one (OP). The ion composition differs in the plume and in the plasmaspheric core (PLS): there is fewer H^+ (panels a and c) and fewer He^+ (panels b and d) inside the plume than inside the inner plasmasphere, as in the two previous plume events. The extent of the plume along the spacecraft orbits is similar to that observed with WHISPER. In particular, there are two density peaks in the inbound plume crossing, consistent with the WHISPER spectrograms. The CIS density is again lower than that deduced from WHISPER (panel e), because of the spacecraft potential and the energy range limitations of the CIS instrument in RPA mode (a few eV).

The drift velocities measured by EDI onboard C1, C2 and C3 during this plasmasphere crossing and projected onto the equatorial plane are displayed in Fig. 16. Inside the plasmasphere, the averaged drift speed V_{D-eq}=2.4±0.2 km/s is close to the co-rotation speed, V_{C-eq}=2.0–2.5 km/s in this region (4.3–4.5 R_E). This velocity departs from V_{C-eq} when the spacecraft move away from the magnetic equator crossed at 05:20 UT, which is expected when the spacecraft are in the outermost shells of the plasmasphere. The behaviour is different between both plume crossings: in the inbound pass, the drift velocity is again in the co-rotation direction with V_{D-eq}=4.4±1.0 km/s, higher than the co-rotation speed at this position (V_{C-eq}=2.8–3.3 km/s). However, the drift velocity during the outbound crossing has a

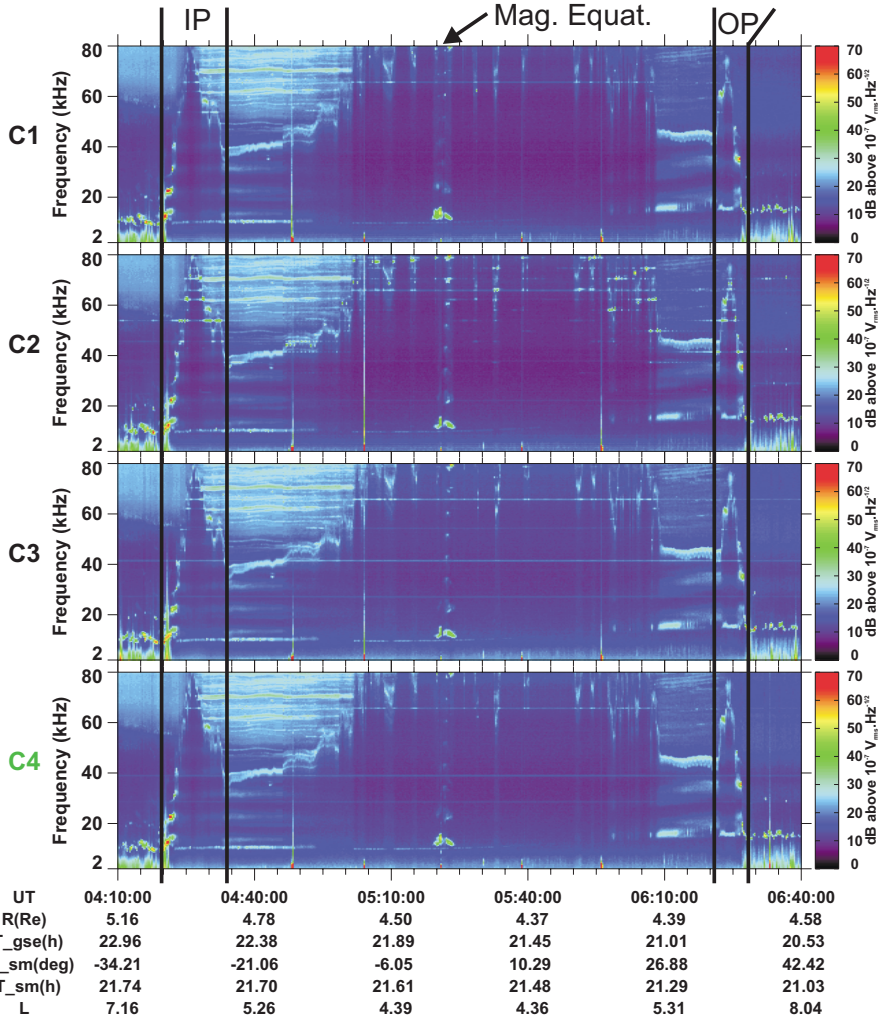

Fig. 14. Frequency-time spectrograms measured by the four CLUSTER/WHISPER instruments on 11 April 2002, showing the entire plasmasphere crossing, including plume traversals in the inbound (IP) and outbound passes (OP) and the magnetic equator (Mag. Equat.) crossed at 05:20 UT. The orbital parameters correspond to C4.

higher radial component (1 km/s) and a lower magnitude (V_{D-eq}=2.0±1.0 km/s on average), except near the location of the maximum density inside the plume (as measured by WHISPER). There, the drift velocity $\boldsymbol{V}_{D-eq}$ is in the co-rotation direction. This is consistent with velocities determined from WHISPER (higher during the inbound pass than during the outbound one): it indicates again a slight outward radial motion of the plume.

During both plume crossings, we do not observe any variations in the magnetic field orientation (see FGM and modelled magnetic field on panels (b)–(e) of Figs. 16 and 17). However, there are significant variations just outside the inbound and outbound plume crossings delimited by the density profiles plotted as a function of time on panel (a) of Figs. 16 and 17.

3.3.2 IMAGE and LANL observations

EUV observations around the time of CLUSTER plume crossings are shown on Fig. 19. These full-frame EUV images, projected onto the dipole magnetic equatorial plane suggest that we deal here with a plume extending from the post-midnight towards the pre-midnight sector. As already shown by Darrouzet et al. (2004), the EUV results are consistent with WHISPER observations. For example, concerning the plasmapause position, the comparison between WHISPER and EUV gives a quite good correspondence. Indeed, in the pre-midnight sector (18:00–21:00 MLT), the plasmapause is around 4.5 R_E from EUV and 5 R_E from WHISPER. Moreover, the plume observed at 04:31 UT and 21:40 MLT extends from 6.4 to 7.1 R_E according to EUV, and from 6.2 to 7.2 R_E according to WHISPER (a bit broader as WHISPER is sensitive to lower densities). At 06:14 UT

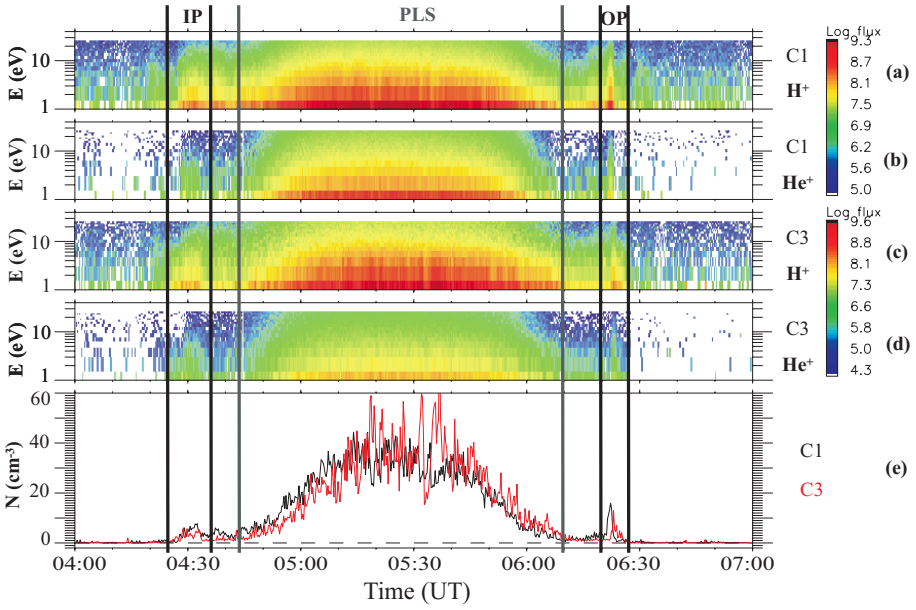

Fig. 15. Data from the CIS instrument in RPA mode on 11 April 2002 during the plasmasphere crossing of C1 and C3 (similar as Fig. 10).

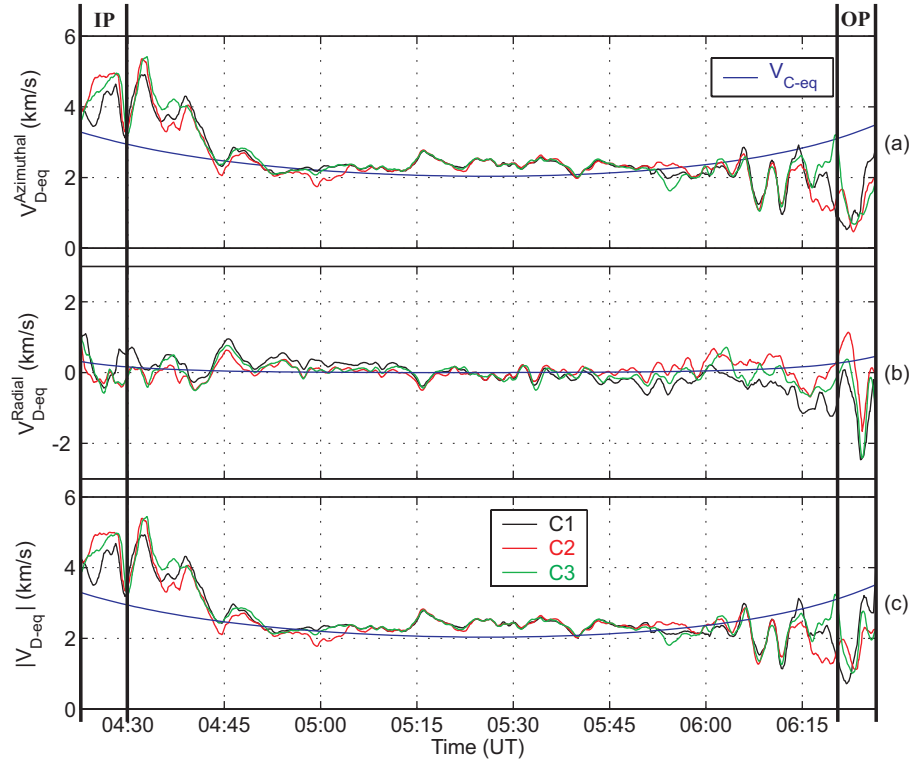

Fig. 16. Electron drift velocity $\boldsymbol{V}_{D-eq}$ measured by EDI and projected onto the magnetic equatorial plane during the plasmasphere crossing of 11 April 2002 (similar as Fig. 5), with the inbound plume crossing (IP) and the outbound one (OP).

and 21:10 MLT, EUV gives a transverse size of about 0.5 R_E, and at 06:24 UT, WHISPER gives a value of 0.7 R_E. The plume is observed in the EUV images for the first time around 01:30 UT, with its foot attached to the plasmasphere around 00:00 MLT, but it is in the shadow of the Earth, so it is quite difficult to locate precisely. It is visible until 08:00 UT, with its foot located around 06:00 MLT. This gives an approximate value for the motion of the foot of the plume (at

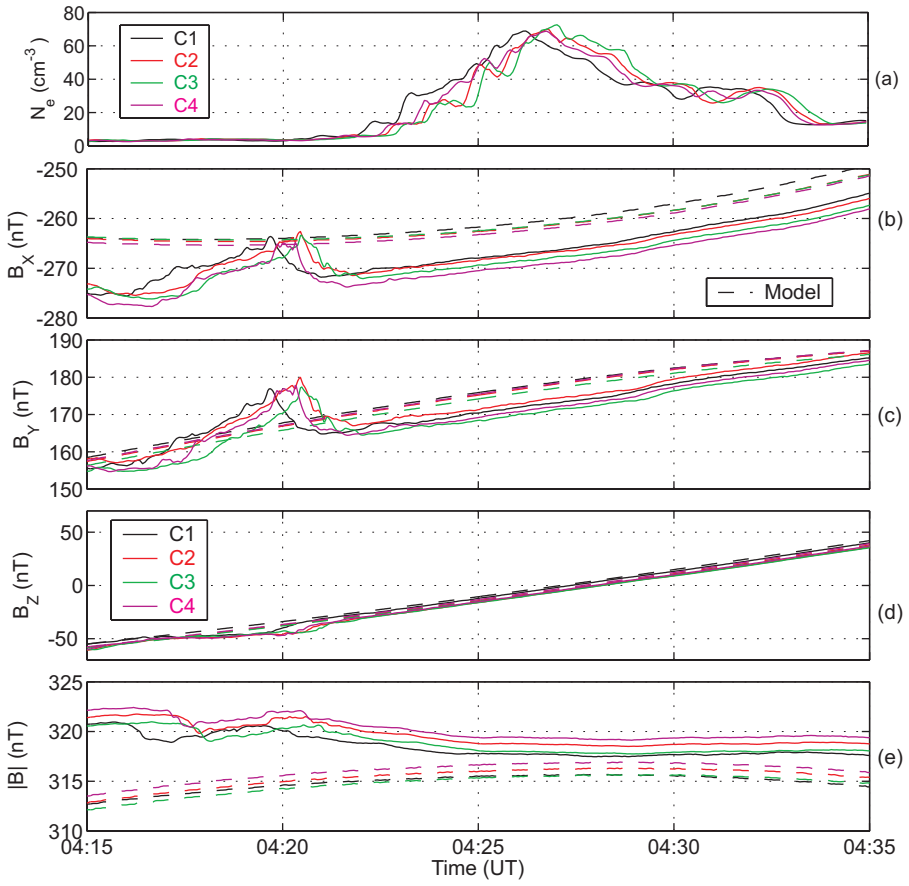

Fig. 17. Different quantities plotted as a function of time during the inbound plume crossing of 11 April 2002 (similar as panels (d)–(h) of Fig. 6).

5.5 R_E) of V_E=2.3±0.1 km/s, slightly below the co-rotation speed V_{C-eq}=2.5 km/s. Although the tip of the plume is almost outside the field of view of the EUV imager, successive images show that the tip of the plume moves at about half the co-rotation angular speed. There is also a small outward radial displacement of 0.2 R_E between 04:30 and 06:15 UT, but this radial motion seems to stop afterwards.

During this plasmasphere crossing, the LANL geosynchronous satellites available are not located in the MLT sectors where CLUSTER and IMAGE observe a plume, i.e. the pre-midnight sector (see the position of LANL 1990-095, LANL 1991-080 and LANL 1994-084 on Fig. 19). A slight ion density increase up to 20 cm^{-3} is observed by LANL 1994-084 around 20:00 MLT a few hours after the CLUSTER crossings, between 09:00 and 10:00 UT, which could be the tip of the plume.

4 Summary and conclusions

Three plasmasphere crossings have been presented in order to compare observations of plasmaspheric plumes by the CLUSTER and IMAGE satellites. The CLUSTER and IMAGE missions are complementary, due to their different measurement techniques (global imaging with IMAGE and in-situ high spatial resolution measurements with CLUSTER). They provide a more complete picture of the plasmasphere and in particular of plumes than any of them taken separately. The LANL geosynchronous satellites can complete this view of the plasmasphere at a fixed distance from the Earth.

The motion of the inner plasmasphere has been analysed with different tools and datasets. The inner shells of the plasmasphere are generally co-rotating with the angular velocity of the Earth. The drift velocity measured onboard CLUSTER departs from the co-rotation when the spacecraft move away from the magnetic equator. Some wavy structures with a period of 100 s have been sometimes observed. These oscillations could be Alfvén waves, but they need further study to be fully identified.

The three events exhibit different characteristics of plasmaspheric plumes, and the comparison between the global view from IMAGE and the in-situ measurements from CLUSTER gives consistent results concerning the radial position and MLT extend of the plumes (see a summary in

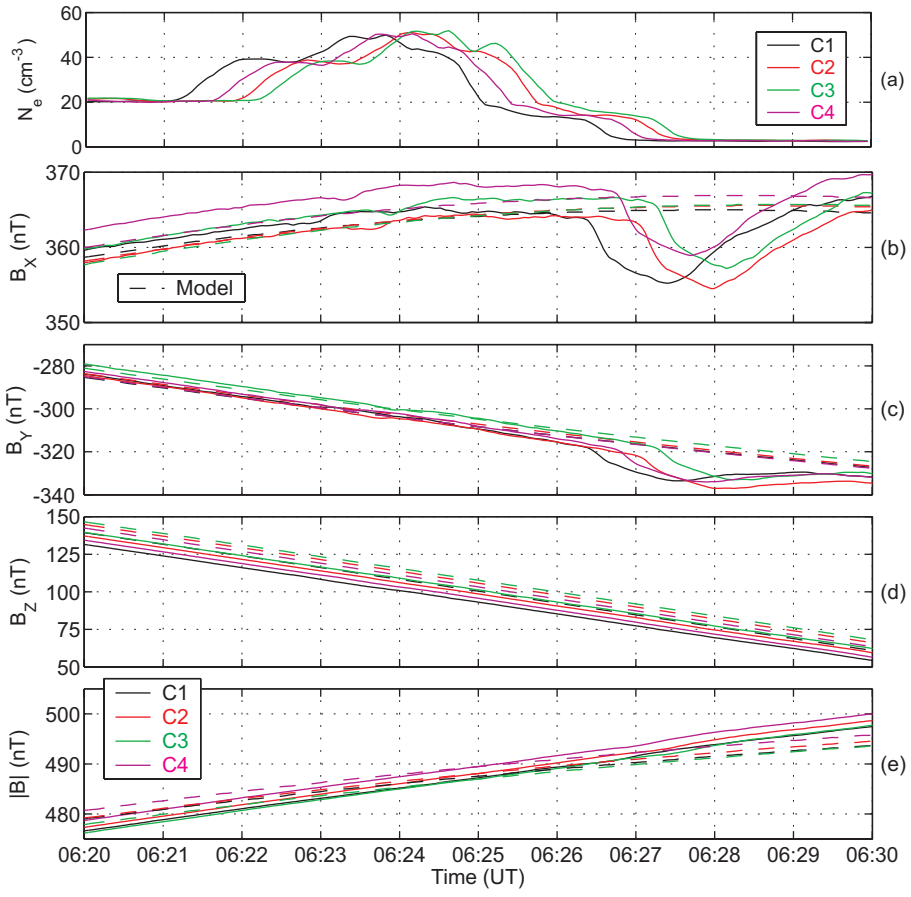

Fig. 18. Similar as Fig. 17 for the outbound plume crossing of 11 April 2002.

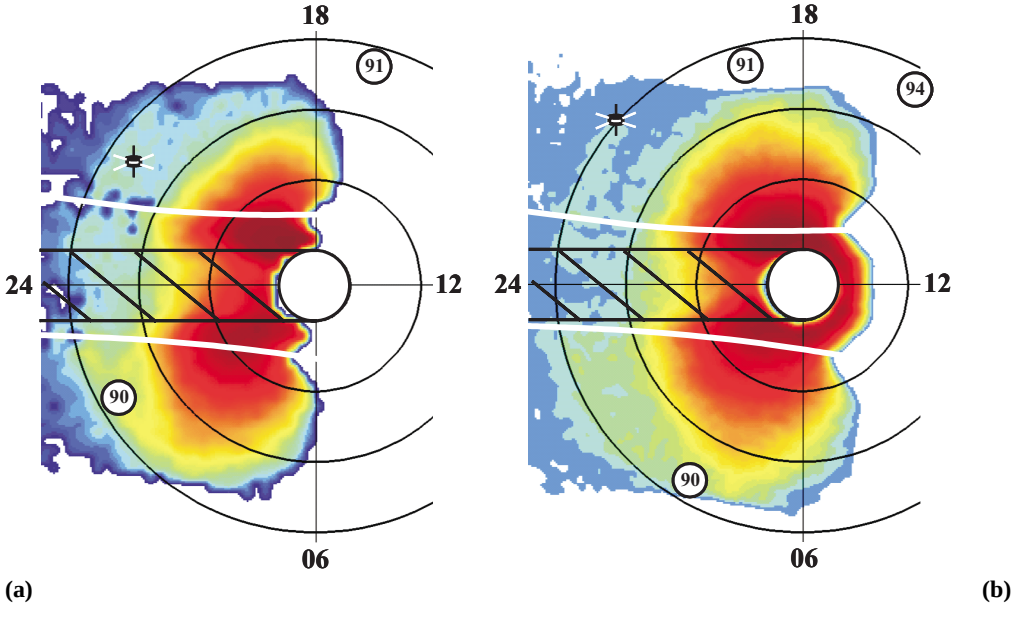

Fig. 19. Projection of a full-frame EUV image onto the magnetic equatorial plane on 11 April 2002 **(a)** at 04:31 UT, **(b)** at 06:14 UT (similar as Fig. 7).

Table 2. Comparison between WHISPER and EUV for the three events about the radial distance of the plume and its MLT position.

Plume Radial Distance at the Equator (R_E):

Date	Time	MLT	WHISPER	EUV
7 May 2002	08:30 UT	20:00 MLT	$7.3 \rightarrow 8.2$	$7.0 \rightarrow 7.7$
2 June 2002	12:30 UT	17:45 MLT	$5.5 \rightarrow 8.5$	$6.0 \rightarrow 7.5$
11 April 2002	04:30 UT	21:40 MLT	$6.2 \rightarrow 7.2$	$6.4 \rightarrow 7.1$
11 April 2002	06:20 UT	21:10 MLT	$6.9 \rightarrow 7.6$	$6.6 \rightarrow 7.1$

Plume Position (MLT):

Date	Time	WHISPER	EUV
7 May 2002	08:30 UT	20:00	20:00 – 01:00
2 June 2002	12:30 UT	17:45	17:30 – 22:00
11 April 2002	04:30 UT	21:40	20:00 – 03:00
11 April 2002	06:20 UT	21:10	21:00 – 04:00

Table 3. Comparison between WHISPER and EUV for the three events about the plasmapause position.

Plasmapause Position (R_E):

Date	Time	MLT	WHISPER	EUV
7 May 2002	08:30 UT	18:00-20:00 MLT	< 4.2	3.7 – 4.0
2 June 2002	12:30 UT	08:00-10:00 MLT	No Data	4.0 – 4.5
11 April 2002	06:30 UT	18:00-21:00 MLT	5.0	4.5

Table 4. Normal directions computed from the two different methods (density gradient and time delay), and projected normal boundary velocities for the three events.

Normal Direction (°) and Normal Boundary Velocity (km/s) from WHISPER Data:

Date MLT	Normal Direction (Density Gradient)	Normal Direction (Time Delay)	Normal Boundary Velocity $V_{N\text{-}eq}$ (Time-Delay)
7 May 2002 20:00 MLT Inbound Plume	Outer Edge: 180 Inner Edge: 330	08:35 UT: 15 08:38 UT: 30	2.3 ± 0.5 3.6 ± 0.5
2 June 2002 17:45 MLT Inbound Plume	Outer Edge: 190 Inner Edge: 340	12:25 UT: 10 12:32 UT: 10	1.2 ± 0.7 0.7 ± 0.2
2 June 2002 18:30 MLT Outbound Plume	Outer Edge: 190 Inner Edge: 40	14:15 UT: 30 14:02 UT: 30	4.2 ± 0.8 1.1 ± 0.3
11 April 2002 21:40 MLT Inbound Plume	Outer Edge: 190 Inner Edge: 10	04:21 UT: 15 04:33 UT: 20	2.1 ± 0.3 1.7 ± 0.3
11 April 2002 21:10 MLT Outbound Plume	Outer Edge: 190 Inner Edge: 10	06:26 UT: 20 06:22 UT: 15	1.4 ± 0.3 1.6 ± 0.3

Table 2). Some plumes are very long and extend across a large MLT sector, up to 04:30 h MLT; their transverse size ranges from 0.5 to 1.5 R_E, and their radial position varies from 5.5 to 8.5 R_E. The plasmapause positions determined from WHISPER and EUV are also consistent (see Table 3). The normal directions of the plume boundaries, as computed using the density gradient tool and the time delay method, are generally consistent with each other (see a summary in Table 4), as well as with the EUV observations.

It is sometimes difficult to clearly detect the plume on EUV images because of its rather high instrumental density threshold (40 ± 10 electrons cm^{-3}): plumes usually have lower densities near the tip. Due to the high altitude of CLUSTER's perigee, the satellites penetrate into the plasmasphere only for moderate to low K_p (as indicated in an earlier study by Darrouzet et al., 2004). In any event, due to the upper frequency limitation of WHISPER (80 kHz, corresponding to 80 cm^{-3}), the observed plumes should not have too high density to be completely resolved (otherwise, densities can be inferred from the EFW spacecraft potential, which is, however, difficult to calibrate).

The ion composition is quite similar in all plume events, with a large amount of H^+, some traces of He^+, and no O^+ in the first event (no data for events 2 and 3). This is consistent with the results of the study by Dandouras et al. (2005).

Table 5. Comparison between the velocities determined from EDI projected onto the equatorial plane and the projected co-rotation velocity for the three events.

	Projected Velocity (km/s):	
Date MLT	$V_{D\text{-}eq}$ (EDI)	$V_{C\text{-}eq}$
7 May 2002 20:00 MLT Inbound Plume	Azimuthal + Radial Outer Edge: 8.5 ± 1.0 Inner Edge: 6.8 ± 1.0	Azimuthal 3.8 – 3.4 3.4 – 3.2
2 June 2002 17:45 MLT Inbound Plume	Azimuthal + Radial Outer Edge: 4.3 ± 1.0 Inner Edge: 2.8 ± 1.0	Azimuthal 3.6 – 2.8 2.8 – 2.4
2 June 2002 18:30 MLT Outbound Plume	Azimuthal Outer Edge: 7.8 ± 1.0 Inner Edge: 3.0 ± 1.0	Azimuthal 2.9 – 3.6 2.7 – 2.9
11 April 2002 21:40 MLT Inbound Plume	Azimuthal Outer Edge: 4.4 ± 1.0 Inner Edge: 4.4 ± 1.0	Azimuthal 3.3 – 3.0 3.0 – 2.8
11 April 2002 21:10 MLT Outbound Plume	Azimuthal + Radial Outer Edge: 2.4 ± 1.0 Inner Edge: 1.7 ± 1.0	Azimuthal 3.3 – 3.6 3.1 – 3.3

The velocity analysis of the plumes gives consistent results with various techniques and different datasets. The results are summarized in Tables 4 and 5. The main conclusion is that the plume is rotating around the Earth, with its foot attached to the main plasmasphere fully co-rotating, but with its tip often rotating more slowly and moving outward, away from the Earth. This result is consistent with the topology of a plume, extending farther out at earlier MLT, as shown in earlier studies on plasmaspheric plumes (Spasojević et al., 2003; Darrouzet et al., 2004). As expected, closer to Earth, the plasma velocities are closer to co-rotation.

To conclude, this study allowed us to have a global idea about the formation, evolution and motion of plasmaspheric plumes from observations on various spacecraft, showing common features but also different aspects of these plumes. This study has been based on small spacecraft separation distance between the four CLUSTER satellites, but the large separation distances planned for the future will give another perspective on plumes, in particular on their evolution on longer time-scales.

Acknowledgements. The B_Y, B_Z, *Dst* and K_p indices as well as the solar wind pressure were provided by the Space Environment Information System (SPENVIS) website (http://www.spenvis.oma.be/spenvis/). The authors acknowledge the LANL data providers, M. Thomsen and the CDAWeb website (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/). The authors thank the referees for their thorough review of the paper and for their valuable suggestions. F. Darrouzet thanks M. Roth for helpful comments and careful reading of the manuscript, M. Kruglanski for his support with the UNILIB library (http://www.oma.be/NEEDLE/unilib.php) and X. Suraud for his help in computing WHISPER spectrograms. F. Darrouzet, J. De Keyser, and J. F. Lemaire acknowledge the support by the Belgian Federal Science Policy Office (BELSPO) through the CLUSTER/PRODEX-8 project (contract 13127/98/NL/VJ (IC)). D. L. Gallagher acknowledges support from the NASA IMAGE mission. V. Pierrard acknowledges the support by BELSPO through the Action 1 grant MO/35/010. B. R. Sandel acknowledges support under NASA contract NAS5-96020. H. Matsui acknowledges the support by NASA through grant NNG04GA46G.

Topical Editor I. A. Daglis thanks M. Thomsen and J. Burch for their help in evaluating this paper.

References

Balogh, A., Carr, C. M., Acuña, M. H., Dunlop, M. W., Beek, T. J., Brown, P., Fornaçon, K.-H., Georgescu, E., Glassmeier, K.-H., Harris, J., Musmann, G., Oddy, T., and Schwingenschuh, K.: The Cluster Magnetic Field Investigation: overview of in-flight performance and initial results, Ann. Geophys., 19, 1207–1217, 2001.

Bame, S. J., McComas, D. J., Thomsen, M. F., Barraclough, B. L., Elphic, R. C., Glore, J. P., Gosling, J. T., Chavez, J. C., Evans, E. P., and Wymer, F. J.: Magnetospheric plasma analyzer for spacecraft with constrained resources, Rev. Sci. Instrum., 64(4), 1026–1033, 1993.

Burch, J. L.: IMAGE mission overview, Space Sci. Rev., 91, 1–14, 2000.

Canu, P., Décréau, P. M. E., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., Seran, H. C., Fergeau, P., Lévêque, M., Martin, Ph., Sené, F. X., Le Guirriec, E., Alleyne, H., and Yearby, K.: Identification of natural plasma emissions observed close to the plasmapause by the Cluster-Whisper relaxation sounder, Ann. Geophys., 19, 1697–1709, 2001.

Carpenter, D. L., Smith, A. J., Giles, B. L., Chappell, C. R., and Décréau, P. M. E.: A case study of plasma structure in the dusk sector associated with enhanced magnetospheric convection, J. Geophys. Res., 97(A2), 1157–1166, 1992.

Carpenter, D. L.: Remote sensing the Earth's plasmasphere, Rad. Sci. Bull., 308, 13–29, 2004.

Carpenter, D. L. and Lemaire, J.: The Plasmasphere Boundary Layer, Ann. Geophys., 22, 4291–4298, 2004.

Chappell, C. R., Harris, K. K., and Sharp, G. W.: The morphology of the bulge region of the plasmasphere, J. Geophys. Res., 75, 3848–3861, 1970.

Chappell, C. R.: Detached plasma regions in the magnetosphere, J. Geophys. Res., 79, 1861–1870, 1974.

Chen, A. J. and Wolf, R. A.: Effects on the plasmasphere of a time-varying convection electric field, Planet. Space Sci., 20, 483–509, 1972.

Chen, A. J. and Grebowsky, J. M.: Plasma tail interpretations of pronounced detached plasma regions measured by Ogo 5, J. Geophys. Res., 79, 3851–3855, 1974.

Dandouras, I., Pierrard, V., Goldstein, J., Vallat, C., Parks, G. K., Rème, H., Gouillart, C., Sevestre, F., McCarthy, M., Kistler, L. M., Klecker, B., Korth, A., Bavassano-Cattaneo, M. B., Escoubet, P., and Masson, A.: Multipoint Observations of Ionic Structures in the Plasmasphere by CLUSTER-CIS and Comparisons With IMAGE-EUV Observations and With Model Simulations, in: Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging, edited by: Burch, J., Schulz, M., and Spence, H., Geophysical Monograph Series, 159, AGU Washington D.C., 23–53, 2005.

Darrouzet, F., Décréau, P. M. E., De Keyser, J., Masson, A., Gallagher, D. L., Santolik, O., Sandel, B. R., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., Le Guirriec, E., Canu, P., Sedgemore, F., André, M., and Lemaire, J. F.: Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations, Ann. Geophys., 22, 2577–2585, 2004.

Darrouzet, F., De Keyser, J., Décréau, P. M. E., Lemaire, J. F., and Dunlop, M. W.: Spatial gradients in the plasmasphere from Cluster, Geophys. Res. Lett., 33, L08105, doi:10.1029/2006GL025727, 2006.

Décréau, P. M. E., Fergeau, P., Krasnoselskikh, V., Lévêque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Sené, F. X., Trotignon, J. G., Canu, P., Mögensen, 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.

Décréau, P. M. E., Fergeau, P., Krasnoselskikh, V., Le Guirriec, E., Lévêque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Rauch, J. L., Sené, F. X., Séran, H. C., Trotignon, J. G., Canu, P., Cornilleau, N., de Féraudy, H., Alleyne, H., Yearby, K., Mögensen, P. B., Gustafsson, G., André, M., Gurnett, D. A., Darrouzet, F., Lemaire, J., Harvey, C. C., Travnicek, P., and Whisper experimenters: Early results from the Whisper instrument on CLUSTER: an overview, Ann. Geophys., 19, 1241–1258, 2001.

Décréau, P. M. E., Ducoin, C., Le Rouzic, G., Randriamboarison, O., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Vallières, X., Canu, P., Darrouzet, F., Gough, M. P., Buckley, A.M., and Carozzi, T. D.: Observation of Continuum radiations from the CLUSTER fleet: first results from direction finding, Ann. Geophys., 22, 2607–2624, 2004.

Décréau, P. M. E., Le Guirriec, E., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Canu, P., Darrouzet, F., Lemaire, J., Masson, A., Sedgemore, F., and André, M.: Density irregularities in the plasmasphere boundary player: Cluster observations in the dusk sector, Adv. Space Res., 36(10), 1964–1969, 2005.

Elphic, R. C., Weiss, L. A., Thomsen, M. F., McComas, D. J., and Moldwin, M. B.: Evolution of plasmaspheric ions at geosynchronous orbit during times of high geomagnetic activity, Geophys. Res. Lett., 23(16), 2189–2192, 1996.

Escoubet, C. P., Russell, C. T., and Schmidt, R. (Eds.): The Cluster and Phoenix Missions, Kluwer Academic Publishers, 658, 1997.

Foster, J. C., Erickson, P. J., Coster, A. J., Goldstein, J., and Rich, F. J.: Ionospheric signatures of plasmaspheric tails, Geophys. Res. Lett., 29(13), 1623, doi:10.1029/2002GL015067, 2002.

Gallagher, D. L., Adrian, M. L., and Liemohn, M. W.: The origin and evolution of deep plasmaspheric notches, J. Geophys. Res., 110, A06201, doi:10.1029/2004JA010906, 2005.

Ganguli, G., Reynolds, M. A., and Liemohn, M. W.: The plasmasphere and advances in plasmaspheric research, J. Atm. Solar-Terr. Phys., 62, 1647–1657, 2000.

Garcia, L. N., Fung, S. F., Green, J. L., Boardsen, S. A., Sandel, B. R., and Reinisch, B. W.: Observations of the latitudinal structure of plasmaspheric convection plumes by IMAGE-RPI and EUV, J. Geophys. Res., 108, 1321, doi:10.1029/2002JA009496, 2003.

Goldstein, J., Sandel, B. R., Hairston, M. R., and Reiff, P. H.: Control of plasmaspheric dynamics by both convection and sub-auroral polarization stream, Geophys. Res. Lett.,30(24), 2243, doi:10.1029/2003GL018390, 2003a.

Goldstein, J., Spasojević, M., Reiff, P. H., Sandel, B. R., Forrester, W. T., Gallagher, D. L., and Reinisch, B. W.: Identifying the plasmapause in IMAGE EUV data using IMAGE RPI in situ steep density gradients, J. Geophys. Res., 108, 1147, doi:10.1029/2002JA009475, 2003b.

Goldstein, J., Sandel, B. R., Thomsen, M. F., Spasojević, M., and Reiff, P. H.: Simultaneous remote sensing and in situ observations of plasmaspheric drainage plumes, J. Geophys. Res., 109, A03202, doi:10.1029/2003JA010281, 2004.

Goldstein, J. and Sandel, B. R.: The Global Pattern of Evolution of Plasmaspheric Drainage Plumes, in: Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging, edited by: Burch, J., Schulz, M., and Spence, H., Geophysical Monograph Series, 159, AGU Washington D.C., 1–22, 2005.

Grebowsky, J. M.: Model study of plasmapause motion, J. Geophys. Res., 75, 4329–4333, 1970.

Gustafsson, G., André, M., Carozzi, T., Eriksson, A. I., Fälthammar, C.-G., Grard, R., Holmgren, G., Holtet, J. A., Ivchenko, N., Karlsson, T., Khotyaintsev, Y., Klimov, S., Laakso, H., Lindqvist, P.-A., Lybekk, B., Marklund, G., Mozer, F., Mursula, K., Pedersen, A., Popielawska, B., Savin, S., Stasiewicz, K., Tanskanen, P., Vaivads, A., and Wahlund, J.-E.: First results of electric field and density observations by Cluster EFW based on initial months of observations, Ann. Geophys., 19, 1219–1240, 2001.

Harvey, C. C.: Spatial gradient and the volumetric tensor; in Analysis methods for Multi-Spacecraft data, edited by: Paschmann, G. and Daly, P. W., ISSI scientific Report SR-001, 307–322, 1998.

Laakso, H. and Pedersen, A.: Ambient electron density derived from differential potential measurements, in: Measurements Techniques in Space Plasmas, edited by: Borovsky, J., Pfaff, P., and Young, D., Geophysical Monograph Series, 102, AGU Washington D.C., 49–54, 1998.

Lemaire, J. F. and Gringauz, K. I.: The Earth's Plasmasphere, with contributions from D. L. Carpenter and V. Bassolo, Cambridge University Press, New York, 372, 1998.

Lemaire, J. F.: The formation plasmaspheric tails, Phys. Chem. Earth (C), 25, 9–17, 2000.

Lemaire, J. F.: The formation of the light-ion-trough and peeling off the plasmasphere, J. Atmos. Terr. Phys., 63, 1285–1291, 2001.

Matsui, H., Quinn, J. M., Torbert, R. B., Jordanova, V. K., Baumjohann, W., Puhl-Quinn, P. A., and Paschmann, G.: Electric field measurements in the inner magnetosphere by Cluster EDI, J. Geophys. Res., 108, 1352, doi:10.1029/2003JA009913, 2003.

Matsui, H., Jordanova, V. K., Quinn, J. M., Torbert, R. B., and Paschmann, G.: Derivation of electric potential patterns in the inner magnetosphere from Cluster EDI data: Initial results, J. Geophys. Res., 109, A10202, doi:10.1029/2003JA010319, 2004.

McIlwain, C. E.: Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles, J. Geophys. Res., 66, 3681–3691, 1961.

Moldwin, M. B., Howard, J., Sanny, J., Bocchicchio, J. D., Rassoul, H. K., and Anderson, R. R.: Plasmaspheric plumes: CRRES observations of enhanced density beyond the plasmapause, J. Geophys. Res., 109, A05202, doi:10.1029/2003JA010320, 2004.

Moullard, O., Masson, A., Laakso, H., Parrot, M., Décréau, P. M. E., Santolik, O., and André, M.: Density modulated whistler mode emissions observed near the plasmapause, Geophys. Res. Lett., 29(20), doi:10.1029/2002GL015101, 2002.

Ober, D. M., Horwitz, J. L., Thomsen, M. F., Elphic, R. C., McComas, D. J., Belian, R. D., and Moldwin, M. B.: Premidnight plasmaspheric "plumes", J. Geophys. Res., 102(A6), 11 325–11 334, 1997.

Paschmann, G., Quinn, J. M., Torbert, R. B., Vaith, H., McIlwain, C. E., Haerendel, G., Bauer, O. H., Bauer, T., Baumjohann, W., Fillius, W., Förster, M., Frey, S., Georgescu, E., Kerr, S. S., Kletzing, C. A., Matsui, H., Puhl-Quinn, P., and Whipple, E. C.: The Electron Drift Instrument on Cluster: overview of first results, Ann. Geophys., 19, 1273–1288, 2001.

Pedersen, A.: Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements, Ann. Geophys., 13, 118–129, 1995.

Pedersen, A., Décréau, P., Escoubet, C. P., Gustafsson, G., Laakso, H., Lindqvist, P.-A., Lybekk, B., Masson, A., Mozer, F., and Vaivads, A.: Four-point high resolution information on electron densities by the electric field experiments (EFW) on Cluster, Ann. Geophys., 19, 1483–1489, 2001.

Pierrard, V. and Lemaire, J. F.: Development of shoulders and plumes in the frame of the interchange instability mechanism for plasmapause formation, Geophys. Res. Lett., 31, L05809, doi:10.1029/2003GL018919, 2004.

Pierrard, V. and Cabrera, J.: Comparisons between EUV/IMAGE observations and numerical simulations of the plasmapause formation, Ann. Geophys., 23, 2635–2646, 2005.

Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J. M., Dandouras, I., Lavraud, B., Sauvaud, J. A., Barthe, A., Bouyssou, J., Camus, Th., Coeur-Joly, O., Cros, A., Cuvilo, J., Ducay, F., Garbarowitz, Y., Médale, J. L., Penou, E., Perrier, H., Romefort, D., Rouzaud, J., Vallat, C., Alcaydé, D., Jacquey, C., Mazelle, C., d'Uston, C., Möbius, E., Kistler, L. M., Crocker, K., Granoff, M., Mouikis, C., Popecki, M., Vosbury, M., Klecker, B., Hovestadt, D., Kucharek, H., Kuenneth, E., Paschmann, G., Scholer, M., Sckopke, N., Seidenschwang, E., Carlson, C. W., Curtis, D. W., Ingraham, C., Lin, R. P., McFadden, J. P., Parks, G. K., Phan, T., Formisano, V., Amata, E., Bavassano-Cattaneo, M. B., Baldetti, P., Bruno, R., Chionchio, G., Di Lellis, A., Marcucci, M. F., Pallocchia, G., Korth, A., Daly, P. W., Graeve, B., Rosenbauer, H., Vasyliunas, V., McCarthy, M., Wilber, M., Eliasson, L., Lundin, R., Olsen, S., Shelley, E. G., Fuselier, S., Ghielmetti, A. G., Lennartsson, W., Escoubet, C. P., Balsiger, H., Friedel, R., Cao, J-B., Kovrazhkin, R. A., Papamastorakis, I., Pellat, R., Scudder, J., and Sonnerup, B.: First multi-spacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment, Ann. Geophys., 19, 1303–1354, 2001.

Roelof, E. C. and Skinner, A. J.: Extraction of ion distributions from magnetospheric ENA and EUV images, Space Sci. Rev., 91, 437–459, 2000.

Sandel, B. R., Broadfoot, A. L., Curtis, C. C., King, R. A., Stone, T. C., Hill, R. H., Chen, J., Siegmund, O. H. W., Raffanti, R., Allred, D. D., Turley, R. S., and Gallagher, D. L.: The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission, Space Sci. Rev., 91, 197–242, 2000.

Sandel, B. R., King, R. A., Forrester, W. T., Gallagher, D. L., Broadfoot, A. L., Curtis, C. C.: Initial Results from the IMAGE Extreme Ultraviolet Imager, Geophys. Res. Lett., 28(8), 1439–1442, 2001.

Sandel, B. R., Goldstein, J., Gallagher, D. L., and Spasojević, M.: Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere, Space Sci. Rev., 109, 25–46, 2003.

Spasojević, M., Goldstein, J., Carpenter D. L., Inan, U. S., Sandel, B. R., Moldwin, M. B., and Reinisch, B. W.: Global response of the plasmasphere to a geomagnetic disturbance, J. Geophys. Res., 108, 1340, doi:10.1029/2003JA009987, 2003.

Spasojević, M., Frey, H. U., Thomsen, M. F., Fuselier, S. A., Gary, S. P., Sandel, B. R., and Inan, U. S.: The link between a detached subauroral proton arc and a plasmaspheric plume, Geophys. Res. Lett., 31, L04803, doi:10.1029/2003GL018389, 2004.

Taylor Jr., H. A., Grebowsky, J. M., and Walsh, W. J.: Structured Variations of the Plasmapause: Evidence of a corotating plasma tail, J. Geophys. Res., 76, 6806–6814, 1971.

Tobiska, W. K., Woods, T., Eparvier, F., Viereck, R., Floyd, L., Bouwer, D., Rottman, G., and White, O. R.: The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool, J. Atmos. Terr. Phys., 62, 1233–1250, 2000.

Trotignon, J. G., Décréau, P. M. E., Rauch, J. L., Randriamboarison, O., Krasnoselskikh, V., Canu, P., Alleyne, H., Yearby, K., Le Guirriec, E., Séran, H. C., Sené, F. X., Martin, Ph., Lévêque, M., and Fergeau, P.: 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., Le Guirriec, E., Canu, P., and Darrouzet, F.: The Whisper Relaxation Sounder Onboard Cluster: A Powerful Tool for Space Plasma Diagnosis around the Earth, Cosmic Research, 41(4), 369–372, 2003.

Tsyganenko, N. A. and Stern, D. P.: Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems, J. Geophys. Res., 101(A12), 27 187–27 198, 1996.

Weiss, L. A., Lambour, R. L., Elphic, R. C., and Thomsen, M. F.: Study of plasmaspheric evolution using geosynchronous observations and global modeling, Geophys. Res. Lett., 24(5), 599–602, 1997.

4 Article 4

Darrouzet, F., De Keyser, J., Décréau, P. M. E., Lemaire, J. F., et Dunlop, M. W.
Spatial gradients in the plasmasphere from Cluster
Geophys. Res. Lett., 33, L08105, doi:10.1029/2006GL025727, 2006b

Spatial gradients in the plasmasphere from Cluster

F. Darrouzet,[1] J. De Keyser,[1] P. M. E. Décréau,[2] J. F. Lemaire,[1] and M. W. Dunlop[3]

Received 10 January 2006; revised 15 February 2006; accepted 17 March 2006; published 26 April 2006.

[1] The Cluster mission allows the study of the plasmasphere with four-point measurements, including its overall density distribution, plasmaspheric plumes close to the plasmapause, and density irregularities inside the plasmasphere. The purpose of this letter is to examine the geometry and orientation of the overall density structure and of the magnetic field. We present a typical Cluster plasmasphere crossing for which we compute the four-point spatial gradient of the electron density and the magnetic field strength, and we compare the direction of both gradients with the local field vector. We discuss the role of the gradient components along and transverse to field lines; transverse density gradients, in particular, are found to suggest the presence of azimuthal density variations. **Citation:** Darrouzet, F., J. De Keyser, P. M. E. Decreau, J. F. Lemaire, and M. W. Dunlop (2006), Spatial gradients in the plasmasphere from Cluster, *Geophys. Res. Lett.*, *33*, L08105, doi:10.1029/2006GL025727.

1. Introduction

[2] The plasmasphere is a torus-shaped region surrounding the Earth, containing cold (a few eV or less) and dense ($10-10^4$ cm^{-3}) ions and electrons of ionospheric origin [*Lemaire and Gringauz*, 1998]. Density structures inside the plasmasphere have been observed by several spacecraft [*Chappell et al.*, 1970; *LeDocq et al.*, 1994; *Moldwin et al.*, 1995] and ground-based instruments [*Carpenter and Lemaire*, 1997]. More recently, small-scale plasmaspheric density structures have been observed onboard IMAGE by the Radio Plasma Imager [*Carpenter et al.*, 2002] and by the Extreme Ultraviolet imager [*Gallagher et al.*, 2005]. With the four-spacecraft Cluster mission, plasma density irregularities have been observed in the dusk sector by the WHISPER instrument [*Décréau et al.*, 2005] and also reported from direct observations of the ion distributions by the CIS experiment [*Dandouras et al.*, 2005]. A first statistical study of these structures has been made [*Darrouzet et al.*, 2004]. These structures are found over a broad range of spatial scales, with a transverse equatorial size from 20 to 5000 km.

[3] The Cluster mission allows the study of the geometry of these density structures and their orientation with respect to the magnetic field with high time resolution data at four nearby points. We analyze a typical plasmasphere crossing by Cluster with a four-point analysis tool: the spatial gradient of a scalar quantity. Except from computing derivatives of the magnetic field components to obtain curl(**B**) and div(**B**), in order to deduce electric current density [*Vallat et al.*, 2005; *Dunlop et al.*, 2006], no scalar gradient has been systematically computed yet, mainly because of calibration issues. This work analyzes a case study in depth, as a first step to improve this situation. After introducing the data set and the analysis technique in Section 2, the plasmasphere crossing is discussed in Section 3. Section 4 presents a summary and conclusions.

2. Data Sets and Analysis Technique

[4] The four Cluster spacecraft (C1, C2, C3, C4) cross the plasmasphere near perigee (around 4 R_E) every 57 hours from the Southern to the Northern Hemisphere. Two physical quantities are used in this study: electron density and magnetic field. The electron density is obtained from the WHISPER (Waves of HIgh frequency and Sounder for Probing Electron density by Relaxation) instrument [*Décréau et al.*, 2001]. In active mode, WHISPER unambiguously identifies the electron plasma frequency F_p [*Trotignon et al.*, 2003], which is related to the electron density N by:

$$F_p[\mathrm{kHz}] = 9\left(N\left[\mathrm{cm}^{-3}\right]\right)^{1/2}$$

F_p can also be inferred using WHISPER passive measurements by estimating the low frequency cut-off of natural plasma emissions [*Canu et al.*, 2001]. WHISPER operates between 2 and 80 kHz. We use the spin average DC magnetic field components measured by the FluxGate Magnetometer FGM [*Balogh et al.*, 2001]. To verify and interpret the results, we create a model magnetic field data set by evaluating a model that combines the internal magnetic field model IGRF2000 and the external magnetic field model Tsyganenko-96 [*Tsyganenko and Stern*, 1996] (computed with the UNILIB library, http://www.oma.be/NEEDLE/unilib.php/20x/) along the spacecraft trajectories.

[5] We compute the spatial gradient of a scalar quantity along the trajectory of the center of mass of the Cluster tetrahedron (method described by *Harvey* [1998]) from simultaneous measurements f^α ($\alpha = 1, \ldots, 4$) of a scalar quantity at the four satellites, postulating that their positions $\boldsymbol{x}^\alpha$ ($\alpha = 1, \ldots, 4$) are close enough to each other, so that all spacecraft are embedded in the same structure at the same time (homogeneity condition). The spatial gradient components $\partial f/\partial i$ for $i = x, y, z$ are then given by:

$$\frac{\partial f}{\partial i} = \frac{1}{2}\frac{1}{4^2}\sum_{j=x,y,z}\left[\sum_{\alpha=1}^{4}\sum_{\beta=1}^{4}\left(f^\alpha - f^\beta\right)\left(x_j^\alpha - x_j^\beta\right)\right] \times R_{ji}^{-1}$$

with R_{ji} the volumetric tensor $\frac{1}{4}\sum_{\alpha=1}^{4} x_j^\alpha x_i^\alpha$.

[1] Belgian Institute for Space Aeronomy (IASB-BIRA), Brussels, Belgium.
[2] Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE/CNRS), Orléans, France.
[3] Rutherford Appleton Laboratory (RAL), Oxon, UK.

Copyright 2006 by the American Geophysical Union.
0094-8276/06/2006GL025727$05.00

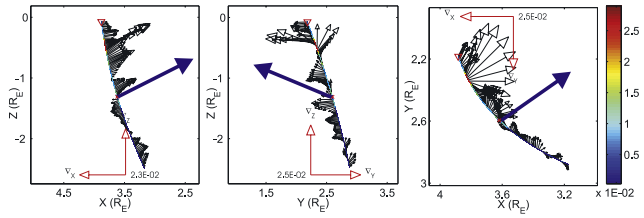

Figure 1. Density gradient vectors projected onto the XZ, YZ and XY GSE planes during the inbound plasmasphere crossing between 07:00 and 08:00 UT on 7 August 2003. The color scale corresponds to the magnitude of the gradient along the trajectory. The blue arrows point toward the Earth.

[6] The computation of a spatial gradient is inherently a difficult operation: It involves calculating the differences of quantities that are similar, and thus results in large relative errors. These errors may be anisotropic, depending on the nature of the spacecraft configuration, as reflected by the volumetric tensor and by the covariance matrix of the error in the determination of the spacecraft position [*Chanteur and Harvey*, 1998]. In addition, the homogeneity condition requires the spacecraft to be close together relative to the size of the physical structure one intends to examine. In that case, the differences between simultaneously measured f^{α} are very small, resulting in a large error on the gradient. To reduce such errors, we filter away any variations at time scales commensurate with length scales shorter than what we are interested in, by smoothing the scalar profiles prior to computing the gradient. As the gradient can be computed for any scalar quantity, it is natural to do so for the electron density obtained from WHISPER's plasma frequency, with its inherent absolute calibration and high measurement frequency resolution of 163 Hz, and for the magnetic field strength from FGM, which is measured with an uncertainty of less than 0.1 nT and which has an inter-calibration error below that value.

3. A Typical Plasmasphere Crossing

[7] We study the plasmasphere crossing on 7 August 2003, between 07:00 and 09:00 UT, at 14:00 LT and between $-30°$ and $30°$ of magnetic latitude. The maximum value of K_p in the previous 24 hours was 2^+, implying a geomagnetically moderately active regime. The spacecraft separation is small (200 × 400 × 1000 km in X, Y, Z GSE directions) and the tetrahedron geometric factors are satisfactory: elongation of 0.85 and planarity between 0.5 and 0.8 (see *Robert et al.* [1998] for detailed explanations about those quantities). The density gradient ∇N on the inbound part of the crossing (Figure 1) is generally toward Earth, with some azimuthal deviations (visible in the XY plane). During the outbound part of the crossing (not shown), the gradient is less regular. The corresponding density profiles are shown in Figure 2a. The magnetic field strength gradient ∇B is very regular, always toward the Earth. By estimating the approximation error on the gradient (related to the homogeneity condition), as well as the error due to measurements uncertainties, we can determine the total error on the gradients: It is 15% for ∇N and 5% for ∇B.

[8] The angles of ∇N and ∇B with respect to the local magnetic field **B** (at the center of mass of the tetrahedron), α_{BN} and α_{BB}, are plotted in Figure 2b (red and blue curves, respectively). Both angles range between $0°$ and $90°$, because we are only interested in the orientation of the gradients, and not in their sense. Making abstraction of the anisotropy of the errors, the orientation of both gradients is known up to a precision of $9°$ for ∇N and $3°$ for ∇B. This is in particular the case for the angles α_{BN} and α_{BB}. The global orientation of the density gradient is also described by its latitude angle $\theta_{\nabla N}$ and its azimuth angle relative to the spacecraft azimuth angle $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc}$ in GEO, plotted in Figures 2c–2d (red). The latitude angle $\theta_{\nabla B}$ and azimuth angle $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc}$ of the gradient of the observed FGM magnetic field (blue, solid curves), as well as of the IGRF2000-Tsyganenko model field (blue, dashed curves) are displayed on the same panels. The precision is $9°$ on $\theta_{\nabla N}$ and $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc}$ and $3°$ on $\theta_{\nabla B}$ and $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc}$.

[9] The magnetic equator, defined as the surface of minimum field strength locations along field lines, is crossed where $\boldsymbol{B}$ and $\nabla \boldsymbol{B}$ are perpendicular, i.e., $\alpha_{BB} = 90°$. This allows an unambiguous identification of the time of crossing of the magnetic equator in Figure 2b at 08:03 UT. Note that this in general does not coincide with

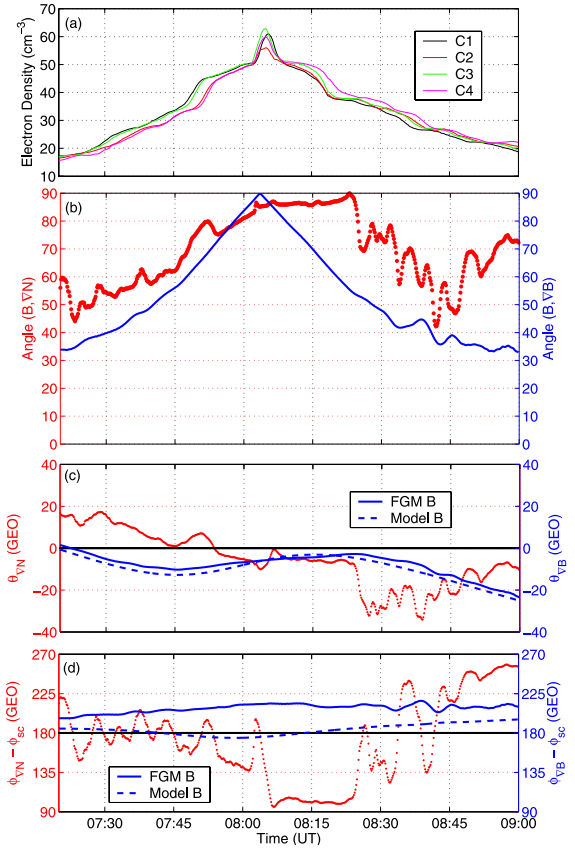

Figure 2. (a) Electron density from WHISPER onboard the four Cluster spacecraft, (b) α_{BB} (blue curve) and α_{BN} (red dots), (c) latitude angle θ_{∇} and (d) azimuth angle $\phi_{\nabla} - \phi_{sc}$ of the density gradient (red) and magnetic field strength gradient (blue), as a function of time during the plasmasphere crossing on 7 August 2003. The angles related to the density gradient ∇N are known up to $9°$, and the angles related to the magnetic field gradient ∇B up to $3°$.

the time of perigee or with the time of maximum density, but there is not much difference in the present case.

[10] Before and after crossing the magnetic equator, the spacecraft sample field lines farther away from the equator and α_{BB} decreases as B increases along a field line in the poleward direction in a progressively steeper fashion. Far from the magnetic equator, α_{BB} becomes more variable; the spacecraft are then in the outer fringes of the plasmasphere, where the magnetic field strength is smaller and plasma β is higher, which could enhance diamagnetic effects.

[11] For both the observed magnetic field (FGM data) and the model field (IGRF-Tsyganenko), the values of $\theta_{\nabla B}$ are comparable; they vary between 0° and −20°. For a tilted dipole (tilt of 10.3° at 71.7°W longitude in 2003), at 08:03 UT and 14:00 LT, the magnetic equator should be at a latitude of 10°; for the actually observed magnetic field, the spacecraft encounter the magnetic equator at θ_{sc} = 8.5° (spacecraft position at 08:03 UT), which is in fair agreement. At the magnetic equator of an exact dipole, $\boldsymbol{\nabla B}$ would point earthward, so that $\theta_{\nabla B} = -\theta_{sc}$; at the actual magnetic equator, the observed value is $\theta^{eq}_{\nabla B} = -6°$, consistent with a dipole somewhat skewed in the North–South direction.

[12] When the Cluster spacecraft cross field lines at higher latitude, the variation of $\theta_{\nabla B}$ depends on how fast B increases away from the magnetic equator. Noting that the spacecraft remain at approximately the same LT, Figure 2b indicates that α_{BB} decreases rapidly, so that $\theta_{\nabla B} > \theta^{eq}_{\nabla B}$ just above the magnetic equator and $\theta_{\nabla B} < \theta^{eq}_{\nabla B}$ just below it. But since the field lines are curved toward the Earth farther away from the equator, ultimately $\theta_{\nabla B} \ll \theta^{eq}_{\nabla B}$ at higher latitudes above the magnetic equator and $\theta_{\nabla B} \gg \theta^{eq}_{\nabla B}$ below it. The actual behavior of $\theta_{\nabla B}$ is determined by the geometry of the field lines and by the interplay between the variation of B along field lines ($\nabla_{\parallel} B$) and its variation across field lines ($\nabla_{\perp} B$), offset by the overall dipole tilt.

[13] The gradient of the observed magnetic field (FGM data) has $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc} \approx 200°$, while it is around 180° for the gradient of the model field (IGRF-Tsyganenko). If the magnetic field would be a tilted dipole, one would expect $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc}$ = 180° at the magnetic equator. The IGRF-Tsyganenko model represents a modified tilted dipole, and indeed has $\phi_{\nabla B} - \phi_{sc}$ close to 180°. The observed azimuth angle of 200° can only be explained by a deviation from cylinder symmetry around the dipole axis.

[14] Before 07:50 UT, between 07:55 and 08:00 UT, and after 08:25 UT, the density changes rather slowly; that is, the spacecraft see similar densities at a given time (Figure 2a), so that α_{BN} depends on the balance between the variations of density along field lines ($\nabla_{\parallel} N$) and across field lines ($\nabla_{\perp} N$) (see Figure 2b), similar to the behavior of α_{BB}. α_{BN} increases progressively as the spacecraft approach the magnetic equator, because of the absence of abrupt $\nabla_{\perp} N$. However, the curve is broader as $\nabla_{\parallel} N / \nabla_{\perp} N \ll \nabla_{\parallel} B / \nabla_{\perp} B$. For the same reason, $\theta_{\nabla N}$ varies from positive values in the Southern Hemisphere to negative values in the Northern Hemisphere, with a large central region where $\theta_{\nabla N} \approx 0°$ (Figure 2c). In the same regions of slow density variations, $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc}$ is fluctuating around 180° (Figure 2d). This seems to indicate the existence of azimuthal ripples, which are similar to the structures described by *Bullough and Sagredo* [1970].

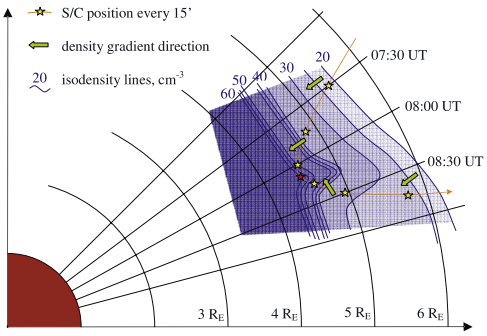

Figure 3. Sketch of the plasmasphere crossing projected onto the equatorial plane in a co-rotating frame centered on 08:00 UT and 14:00 LT, on 7 August 2003. The density gradient is inward during the inbound part of the crossing; it points azimuthally duskward for much of the outbound part.

[15] When the spacecraft observe markedly different densities at a given time (in the density step at 07:50–07:55 UT, and during the whole period 08:00–08:25 UT), the density gradients are definitely stronger (Figure 2a). This is due to an important contribution of $\nabla_{\perp} N$. Then $\nabla_{\parallel} N \ll \nabla_{\perp} N$ there, so $\alpha_{BN} \approx 90°$ (Figure 2b) and $\theta_{\nabla N} \approx 0°$ (Figure 2c). These gradients correspond to transverse density structure, as noticed before in the density gradient projections (Figure 1).

[16] During the density step at 07:50–07:55 UT, $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc}$ is close to 180° (Figure 2d), showing that the spacecraft cross perpendicularly through this density interface, evident also in Figure 2a by the sequential passing of the spacecraft through the density step. However, during much of the outbound pass (08:00–08:25 UT), $\phi_{\nabla N} - \phi_{sc} \approx 90°$, indicating a crossing tangent to the density structure, visible in Figure 2a by the spacecraft remaining at different positions across the density interface for an extended time. The corresponding geometry in the equatorial plane is sketched in Figure 3. One can verify that, for these structures, the homogeneity condition is satisfied.

4. Summary and Conclusions

[17] We have presented the first systematic spatial gradient results from the four-spacecraft Cluster mission in the plasmasphere, thus providing the spatial gradient of density and magnetic field strength from well-calibrated, unbiased measurements. This produces a more complete view of the geometry of the outer plasmasphere. It allows the evaluation of the relative importance between the two effects influencing the spatial gradients inside the plasmasphere: the increase of the density and the magnetic field strength along the field lines away from the equator, and the decrease of these two quantities away from Earth.

[18] The variations of the magnetic field strength along the field lines are rather fast, with $\nabla_{\parallel} B > \nabla_{\perp} B$ (except very close to the magnetic equator). We find the latitudinal magnetic field structure to be compatible with a tilted dipole, but there appear to be significant deviations from cylindrical symmetry.

[19] The overall density structure is mainly aligned with the magnetic field at these magnetic latitudes (±30°) with pronounced transverse density structure. The density variations across the field lines are more pronounced than those

along the field lines, producing gradients with $\nabla_{\perp} N > \nabla_{\parallel} N$. From an IMAGE study, *Reinisch et al.* [2001] also found that the density does not change very much along a flux tube at low magnetic latitudes. The presence of the transverse density gradients makes it difficult to evaluate the effect of the magnetic field tilt on the density distribution. In any case, there is no evidence for sharp density gradients along field lines (the value of α_{BN} rarely drops below 50°), such as would be expected in shocks propagating along the field lines; this suggests that refilling of flux tubes is a gradual process as described by *Lemaire* [1989].

[20] There are limitations to the practical applicability of the gradient analysis techniques presented here. The upper limit (80 kHz) of the WHISPER instrument allows density measurements up to $N \approx 80$ cm^{-3}. On occasions when the Cluster spacecraft dive deeper into the plasmasphere (though always limited by the relatively high perigee at 4 R_E), higher densities can be derived from the spacecraft potential, with WHISPER aiding in calibrating the low density measurements. It remains, however, difficult to properly calibrate data at higher densities, rendering reliable gradient computations difficult in those cases. It should also be noted that the gradient computations are justified only when the homogeneity condition is satisfied.

[21] **Acknowledgment.** F. Darrouzet, J. De Keyser and J. F. Lemaire acknowledge the support by the Belgian Federal Services for Scientific, Technical, and Cultural Affairs and by the ESA/PRODEX Cluster project.

References

Balogh, A., et al. (2001), The Cluster Magnetic Field Investigation: Overview of in-flight performance and initial results, *Ann. Geophys.*, *19*, 1207–1217.

Bullough, K., and J. L. Sagredo (1970), Longitudinal structure in the plasmapause: VLF goniometer observations of knee-whistlers, *Nature*, *225*, 1038–1039.

Canu, P., et al. (2001), Identification of natural plasma emissions observed close to the plasmapause by the Cluster-Whisper relaxation sounder, *Ann. Geophys.*, *19*, 1697–1709.

Carpenter, D. L., and J. Lemaire (1997), Erosion and recovery of the plasmasphere in the plasmapause region, *Space Sci. Rev.*, *80*, 153–179.

Carpenter, D. L., et al. (2002), Small-scale field-aligned plasmaspheric density structures inferred from the Radio Plasma Imager on IMAGE, *J. Geophys. Res.*, *107*(A9), 1258, doi:10.1029/2001JA009199.

Chanteur, G., and C. C. Harvey (1998), Spatial interpolation for four spacecraft: Application to magnetic gradients, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, edited by G. Paschmann and P. W. Daly, *ISSI Sci. Rep. SR-001*, pp. 371–393, Int. Space Sci. Inst., Bern.

Chappell, C. R., K. K. Harris, and G. Sharp (1970), 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.

Dandouras, I., et al. (2005), Multipoint observations of ionic structures in the plasmasphere by CLUSTER-CIS and comparisons with IMAGE-EUV observations and with model simulations, in *Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 159, edited by J. L. Burch, M. Schulz, and H. Spence, pp. 23–53, AGU, Washington, D. C.

Darrouzet, F., et al. (2004), Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations, *Ann. Geophys.*, *22*, 2577–2585.

Décréau, P. M. E., et al. (2001), Early results from the Whisper instrument on Cluster: An overview, *Ann. Geophys.*, *19*, 1241–1258.

Décréau, P. M. E., et al. (2005), Density irregularities in the plasmasphere boundary player: Cluster observations in the dusk sector, *Adv. Space Res.*, *36*, 1964–1969.

Dunlop, M. W., et al. (2006), The Curlometer and other gradient measurements with Cluster, in *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium: 5th Anniversary of Cluster in Space*, *Eur. Space Agency Spec. Publ.*, *ESA SP-598*.

Gallagher, D. L., M. L. Adrian, and M. W. Liemohn (2005), Origin and evolution of deep plasmaspheric notches, *J. Geophys. Res.*, *110*, A09201, doi:10.1029/2004JA010906.

Harvey, C. C. (1998), Spatial gradients and the volumetric tensor, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, edited by G. Paschmann and P. W. Daly, *ISSI Sci. Rep. SR-001*, pp. 307–322, Int. Space Sci. Inst., Bern.

LeDocq, M. J., D. A. Gurnett, and R. R. Anderson (1994), Electron number density fluctuations near the plasmapause observed by the CRRES spacecraft, *J. Geophys. Res.*, *99*, 23,661–23,671.

Lemaire (1989), Plasma distribution models in a rotating magnetic dipole and refilling plasmaspheric flux tubes, *Phys. Fluids*, *32*, 1519–1527.

Lemaire, J. F., and K. I. Gringauz (Eds.) (1998), *The Earth's Plasmasphere*, 372 pp., Cambridge Univ. Press, New York.

Moldwin, M. B., M. F. Thomsen, S. J. Bame, D. McComas, and G. D. Reeves (1995), The fine-scale structure of the outer plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, *100*, 8021–8030.

Reinisch, B. W., X. Huang, P. Song, G. S. Sales, S. F. Fung, J. L. Green, D. L. Gallagher, and V. M. Vasyliunas (2001), Plasma density distribution along the magnetospheric field: RPI observations from IMAGE, *Geophys. Res. Lett.*, *28*, 4521–4524.

Robert, P., A. Roux, C. C. Harvey, M. W. Dunlop, P. W. Daly, and K.-H. Glassmeier (1998), Tetrahedron geometric factors, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, edited by G. Paschmann and P. W. Daly, *ISSI Sci. Rep. SR-001*, pp. 323–348, Int. Space Sci. Inst., Bern.

Trotignon, J. G., P. M. E. Décréau, J. L. Rauch, E. Le Guirriec, P. Canu, and F. Darrouzet (2003), The Whisper relaxation sounder onboard Cluster: A powerful tool for space plasma diagnosis around the Earth, *Cosmic Res.*, *41*, 369–372.

Tsyganenko, N. A., and D. P. Stern (1996), Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems, *J. Geophys. Res.*, *101*, 27,187–27,198.

Vallat, C., et al. (2005), First current density measurements in the ring current region using simultaneous multi-spacecraft Cluster-FGM data, *Ann. Geophys.*, *23*, 1849–1865.

F. Darrouzet, J. De Keyser, and J. F. Lemaire, Belgian Institute for Space Aeronomy (IASB-BIRA), 3 Avenue Circulaire, B-1180 Brussels, Belgium. (fabien.darrouzet@oma.be; johan.dekeyser@oma.be; joseph.lemaire@oma.be)

P. M. E. Décréau, Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE/CNRS), 3A, Avenue de la Recherche Scientifique, F-45071 Orléans Cedex 2, France. (pdecreau@cnrs-orleans.fr)

M. W. Dunlop, Rutherford Appleton Laboratory (RAL), Oxon OX11 0QX, UK. (m.w.dunlop@rl.ac.uk)

Bibliographie

R. ANDRÉ, F. LEFEUVRE, F. SIMONET et U. S. INAN, A first approach to model the low-frequency wave activity in the plasmasphere, *Ann. Geophys.*, *20*, 981–996, 2002.

V. ANGELOPOULOS, F. V. CORONITI, C. F. KENNEL, M. G. KIVELSON, R. J. WALKER, C. T. RUSSELL, R. L. MCPHERRON, E. SANCHEZ, C.-I. MENG, W. BAUMJOHANN, G. D. REEVES, R. D. BELIAN, N. SATO, E. FRIIS-CHRISTENSEN, P. R. SUTCLIFFE, K. YUMOTO et T. HARRIS, Multipoint analysis of a bursty bulk flow event on April 11, 1985, *J. Geophys. Res.*, *101*, 4967–4990, 1996.

C. W ARTHUR, R. L. MCPHERRON et L. J. LANZEROTTI, Geomagnetic Field Fluctuations at Synchronous Orbit, 1. Power Spectra, *J. Geophys. Res.*, *83*, 3859–3865, 1978.

A. BAHNSEN, M. JESPERSEN, E. UNGSTRUP, R. POTTELETTE et M. MALINGRE, First Viking Results: High Frequency Waves, *Phys. Scripta*, *37*, 469–474, 1988.

A. BALOGH, 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.

A. BALOGH, C. M. CARR, M. H. ACUÑA, M. W. DUNLOP, T. J. BEEK, P. BROWN, K.-H. FORNAÇON, E. GEORGESCU, K.-H. GLASSMEIER, J. HARRIS, G. MUSMANN, T. ODDY et K. SCHWINGENSCHUH, The Cluster Magnetic Field Investigation: overview of in-flight performance and initial results, *Ann. Geophys.*, *19*, 1207–1217, 2001.

S. J. BAME, D. J. MCCOMAS, M. F. THOMSEN, B. L. BARRACLOUGH, R. C. ELPHIC, J. P. GLORE, J. T. GOSLING, J. C. CHAVEZ, E. P. EVANS et F. J. WYMER, Magnetospheric plasma analyzer for spacecraft with constrained resources, *Rev. Sci. Instrum.*, *64*, 1026–1033, 1993.

P. M. BANKS et T. E. HOLZER, The polar wind, *J. Geophys. Res.*, *73*, 6846–6854, 1968.

J. BARTELS, N. H. HECK et H. F. JOHNSTON, The three-hour-range index measuring geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, *44*, 411–454, 1939.

T. M. BAUER, M. W. DUNLOP, B. U. Ö. SONNERUP, N. SCKOPKE, A. N. FAZAKERLEY et A. V. KHRABROV, Dual spacecraft determinations of magnetopause motion, *Geophys. Res. Lett.*, *27*, 1835–1838, 2000.

V. V. BEZRUKIKH et K. I. GRINGAUZ, The hot zone in the outer plasmasphere of the Earth, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *38*, 1085–1091, 1976.

J. L. BURCH, IMAGE mission overview, *Space Sci. Rev.*, *91*, 1–14, 2000.

J. L. BURCH, J. GOLDSTEIN et B. R. SANDEL, Cause of plasmasphere corotation lag, *Geophys. Res. Lett.*, *31*, L05 802, doi:10.1029/2003GL019164, 2004.

P. CANU, P. M. E. DÉCRÉAU, J. G. TROTIGNON, J. L. RAUCH, H. C. SÉRAN, P. FERGEAU, M. LÉVÊQUE, Ph. MARTIN, F. X. SENÉ, E. LE GUIRRIEC, H. ALLEYNE et K. YEARBY, Identification of natural plasma emissions observed close to the plasmapause by the Cluster-Whisper relaxation sounder, *Ann. Geophys.*, *19*, 1697–1709, 2001.

D. L. CARPENTER, Whistler evidence of a "knee" in the magnetospheric ionization density profile, *J. Geophys. Res.*, *68*, 1675–1682, 1963.

D. L. CARPENTER, Whistler studies of the plasmapause 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.

D. L. CARPENTER et R. R. ANDERSON, An ISEE/Whistler Model of Equatorial Electron Density in the Magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, *97*, 1097–1108, 1992.

D. L. CARPENTER et J. LEMAIRE, The Plasmasphere Boundary Layer, *Ann. Geophys.*, *22*, 4291–4298, 2004.

D. L. CARPENTER, A. J. SMITH, B. L. GILES, C. R. CHAPPELL et P. M. E. DÉCRÉAU, A case study of plasma structure in the dusk sector associated with enhanced magnetospheric convection, *J. Geophys. Res.*, *97*, 1157–1166, 1992.

D. L. CARPENTER, B. L. GILES, C. R. CHAPPELL, P. M. E. DÉCRÉAU, R. R. ANDERSON, A. M. PERSOON, A. J. SMITH, Y. CORCUFF et P. CANU, Plasmasphere dynamics in the duskside bulge region: A new look at an old topic, *J. Geophys. Res.*, *98*, 19 243–19 271, 1993.

G. CHANTEUR, Spatial Interpolation for Four Spacecraft: Theory, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, édité par G. Paschmann et P. W. Daly, pp. 349–369, ISSI Scientific Report SR-001, 1998.

G. CHANTEUR et C. C. HARVEY, Spatial Interpolation for Four Spacecraft: Application to Magnetic Gradients, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, édité par G. Paschmann et P. W. Daly, pp. 371–393, ISSI Scientific Report SR-001, 1998.

S. CHAPMAN et V. C. A. FERRARO, A new theory of magnetic storms, Part I, The initial phase, *Terr. Mag. Atmos. Elect.*, *36*, 77–97, 1931.

C. R. CHAPPELL, Detached plasma regions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, *79*, 1861–1870, 1974.

C. R. CHAPPELL, K. K. HARRIS et G.W. SHARP, The morphology of the bulge region of the plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, *75*, 3848–3861, 1970*a*.

C. R. CHAPPELL, 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, 1970*b*.

A. J. CHEN et J. M. GREBOWSKY, Plasma tail interpretations of pronounced detached plasma regions measured by Ogo 5, *J. Geophys. Res.*, *79*, 3851–3855, 1974.

A. J. CHEN et R. A. WOLF, Effects on the plasmasphere of a time-varying convection electric field, *Planet. Space Sci.*, *20*, 483–509, 1972.

R. H. COMFORT, Thermal structure of the plasmasphere, *Adv. Space Res.*, *17*, 175–184, 1996.

N. CORNILLEAU-WEHRLIN, 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.

I. DANDOURAS, V. PIERRARD, J. GOLDSTEIN, C. VALLAT, G. K. PARKS, H. RÈME, C. GOUILLART, F. SEVESTRE, M. MCCARTHY, L. M. KISTLER, B. KLECKER, A. KORTH, M. B. BAVASSANO-CATTANEO, P. ESCOUBET et A. MASSON, Multipoint Observations of Ionic Structures in the Plasmasphere by CLUSTER-CIS and Comparisons With IMAGE-EUV Observations and With Model Simulations, in *Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging*, édité par J. Burch, M. Schulz, et H. Spence, pp. 23–53, AGU Geophysical Monograph Series, 159, 2005.

F. DARROUZET et J. F. LEMAIRE, The SEVEM Project: Statistical ELF and VLF Environment Models, *Le Bulletin du Centre de Données de la Physique des Plasma*, *N5*, 2002.

F. DARROUZET, P. M. E. DÉCRÉAU et C. HARVEY, Analysis Software for the Cluster Mission: The Spatial Gradient of Density, *Space Science Research in Belgium, 1994-2000*, 95–101, 2001*a*.

F. DARROUZET, J. F. LEMAIRE et A. ORR, The SEVEM Project: Statistical ELF and VLF Environment Models, *Space Science Research in Belgium, 1994-2000*, 103–107, 2001*b*.

F. DARROUZET, P. M. E. DÉCRÉAU et J. LEMAIRE, The Cluster Mission, Preliminary Results Obtained with the WHISPER Experiment, *Physicalia Magazine*, *24*, 1–16, 2002.

F. DARROUZET, W. N. SPJELDVIK, J. F. LEMAIRE, G. GUSTAFSSON, C. HANN et C. DYCK, Towards statistical and empirical models of the distribution of VLF waves at high latitude from the observations of the Viking spacecraft, *Adv. Space Res.*, *32*, 323–328, 2003.

F. DARROUZET, 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.

F. DARROUZET, 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, 2006*a*.

F. DARROUZET, 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, 2006*b*.

J. DE KEYSER et M. ROTH, Structural analysis of periodic surface waves on the magnetospheric boundary, *Planet. Space Sci.*, *51*, 757–768, 2003.

J. DE KEYSER, F. DARROUZET, M. ROTH, O. L. VAISBERG, N. RYBJEVA, V. SMIRNOV, L. AVANOV, Z. NEMECEK et J. SAFRANKOVA, Transients at the dawn and dusk side magnetospheric boundary: Surface waves or isolated plasma blobs?, *J. Geophys. Res.*, *106*, 25 503–25 516, 2001.

J. DE KEYSER, F. DARROUZET et M. ROTH, Trying to bring the magnetopause to a standstill, *Geophys. Res. Lett.*, *29*, 1453, doi:10.1029/2002GL015001, 2002.

J. DE KEYSER, G. GUSTAFSSON, M. ROTH, F. DARROUZET, M. DUNLOP, H. RÈME, A. FAZAKERLEY, P. DÉCRÉAU et N. CORNILLEAU-WEHRLIN, Reconstruction of the magnetopause and low latitude boundary layer topology using Cluster multi-point measurements, *Ann. Geophys.*, *22*, 2381–2389, 2004.

J. DE KEYSER, M. ROTH, M. W. DUNLOP, H. RÈME, C. J. OWEN et G. PASCHMANN, Empirical reconstruction and long-duration tracking of the magnetospheric boundary in single- and multi-spacecraft contexts, *Ann. Geophys.*, *23*, 1355–1369, 2005*a*.

J. DE KEYSER, M. W. DUNLOP, C. J. OWEN, B. U. Ö. SONNERUP, S. E. HAALAND, A. VAIVADS, G. PASCHMANN, R. LUNDIN et L. REZEAU, Magnetopause and Boundary Layer, *Space Sci. Rev.*, *118*, 231–320, 2005*b*.

P. M. E. DÉCRÉAU, D. CARPENTER, C. R. CHAPPELL, R. H. COMFORT, J. GREEN, R. C. OLSEN et J. H. WAITE JR., Latitudinal plasma distribution in the dusk plasmaspheric bulge: Refilling phase and quasi-equilibrium state, *J. Geophys. Res.*, *91*, 6929–6943, 1986.

P. M. E. DÉCRÉAU, 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.

P. M. E. DÉCRÉAU, P. FERGEAU, V. KRASNOSELS'KIKH, E. LE GUIRRIEC, M. LÉVÊQUE, Ph. MARTIN, O. RANDRIAMBOARISON, J. L. RAUCH, F. X. SENÉ, H. C. SÉRAN, J. G. TROTIGNON, P. CANU, N. CORNILLEAU, H. de FÉRAUDY, H. ALLEYNE, K. YEARBY, P. B. MÖGENSEN, G. GUSTAFSSON, M. ANDRÉ, D. A. GURNETT, F. DARROUZET, J. LEMAIRE,

C. C. HARVEY, P. TRAVNICEK et Whisper EXPERIMENTERS, Early results from the Whisper instrument on Cluster: an overview, *Ann. Geophys.*, *19*, 1241–1258, 2001*a*.

P. M. E. DÉCRÉAU, 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*b*.

P. M. E. DÉCRÉAU, E. LE GUIRRIEC, J. L. RAUCH, J. G. TROTIGNON, F. DARROUZET, J. SOUCEK, P. CANU, M. DUNLOP, A. BALOGH et F. SEDGEMORE, Electron density structures measured by the Whisper/Cluster instrument: case studies at magnetopause traversals and in the magnetosphere, *Geophys. Res. Abstr.*, *4*, 2002.

P. M. E. DÉCRÉAU, C. DUCOIN, G. LE ROUZIC, O. RANDRIAMBOARISON, J. L. RAUCH, J. G. TROTIGNON, Canu P. VALLIÈRES, X., F. DARROUZET, M. P. GOUGH, A.M. BUCKLEY et T. D. CAROZZI, Observation of Continuum radiations from the CLUSTER fleet : first results from direction finding, *Ann. Geophys.*, *22*, 2607–2624, 2004.

P. M. E. DÉCRÉAU, E. LE GUIRRIEC, J. L. RAUCH, J. G. TROTIGNON, P. CANU, F. DARROUZET, J. LEMAIRE, A. MASSON, F. SEDGEMORE et M. ANDRÉ, Density irregularities in the plasmasphere boundary player: Cluster observations in the dusk sector, *Adv. Space Res.*, *36*, 1964–1969, 2005.

R. E. DENTON, J. D. MENIETTI, J. GOLDSTEIN, S. L. YOUNG et R. R. ANDERSON, Electron density in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, *109*, A09 215, doi:10.1029/2003JA010245, 2004.

J. W. DUNGEY, Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, *6*, 47–48, 1961.

J. W. DUNGEY, The theory of the quiet magnetosphere, in *Proceedings of the 1966 Symposium on Solar-Terrestrial Physics*, édité par J. W. King et W. S. Newman, pp. 91–106, Belgrade, 1967.

M. W. DUNLOP, A. BALOGH et K.-H. GLASSMEIER, Four-point Cluster application of magnetic field analysis tools: The discontinuity analyzer, *J. Geophys. Res.*, *107*, 1385, doi: 10.1029/2001JA005089, 2002.

M. W. DUNLOP, A. BALOGH, Q.-Q. SHI, Z. PU, C. VALLAT, P. ROBERT, S. HAALAND, C. SHEN, J. A. DAVIES, K.-H. GLASSMEIER, P. CARGILL, F. DARROUZET et A. ROUX, The Curlometer and other gradient measurements with Cluster, *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5^{th} Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598*, Janvier 2006.

M. M. ECHIM et J. F. LEMAIRE, Laboratory and numerical simulations of the impulsive penetration mechanism, *Space Sci. Rev.*, *92*, 565–601, 2000.

P. EIGES, G. ZASTENKER, M. NOZDRACHEV, N. RYBYEVA, J. SAFRANKOVA et Z. NEMECEK, Small scale solar wind ion flux and IMF quasi-harmonical structures in the Earth's foreshock: INTERBALL-1 and MAGION-4 observations, *Adv. Space Res.*, *30*, 2725–2729, 2002.

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 et S. BOARDSEN, Electrostatic and electromagnetic emissions near the plasmasphere. A case event: 27 May 2003, *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5^{th} Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598,* Janvier 2006.

R. C. ELPHIC, 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.

R. E. ERLANDSON et A. J. UKHORSKIY, Observations of electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms: Wave occurrence and pitch angle scattering, *J. Geophys. Res.*, *106*, 3883–3895, 2001.

R. E. ERLANDSON et L. J. ZANETTI, A statistical study of auroral electromagnetic ion cyclotron waves, *J. Geophys. Res.*, *103*, 4627–4636, 1998.

C. P. ESCOUBET, C. T. RUSSELL et R. SCHMIDT, éds., *The Cluster and Phoenix Missions*, 658 pp., Kluwer Academic Publishers, 1997.

R. J. FITZENREITER et K. W. OGILVIE, Kelvin-Helmholtz Instability at the Magnetopause: Observations, in *Physics of the Magnetopause*, édité par P. Song, B. U. O. Sonnerup, et M. F. Thomsen, pp. 277–283, AGU Geophysical Monograph Series, 90, 1995.

J. C. FOSTER, P. J. ERICKSON, A. J. COSTER, J. GOLDSTEIN et F. J. RICH, Ionospheric signatures of plasmaspheric tails, *Geophys. Res. Lett.*, *29*, 1623, doi:10.1029/2002GL015067, 2002.

B. J. FRASER et T. S. NGUYEN, Is the plasmapause a preferred source region of electromagnetic ion cyclotron waves in the magnetosphere?, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *63*, 1225–1247, 2001.

D. L. GALLAGHER, P. D. CRAVEN et R. H. CONFORT, Global core plasma model, *J. Geophys. Res.*, *105*, 18 819–18 833, 2000.

D. L. GALLAGHER, M. L. ADRIAN et M. W. LIEMOHN, Origin and evolution of deep plasmaspheric notches, *J. Geophys. Res.*, *110*, A09 201, doi:10.1029/2004JA010906, 2005.

Y. I. GALPERIN, V. S. SOLOVIEV, K. TORKAR, J. C. FOSTER et M. V. VESELOV, Predicting plasmaspheric radial density profiles, *J. Geophys. Res.*, *102*, 2079–2091, 1997.

G. GANGULI, M. A. REYNOLDS et M. W. LIEMOHN, The plasmasphere and advances in plasmaspheric research, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, *62*, 1647–1657, 2000.

L. N. GARCIA, S. F. FUNG, J. L. GREEN, S. A. BOARDSEN, B. R. SANDEL et B. W. REINISCH, Observations of the latitudinal structure of plasmaspheric convection plumes by IMAGE-RPI and EUV, *J. Geophys. Res.*, *108*, 1321, doi:10.1029/2002JA009496, 2003.

T. GOLD, Plasma and Magnetic Fields in the Solar System, *J. Geophys. Res.*, *64*, 1665–1674, 1959.

J. GOLDSTEIN et B. R. SANDEL, The Global Pattern of Evolution of Plasmaspheric Drainage Plumes, in *Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging*, édité par J. L. Burch, M. Schulz, et H. Spence, pp. 1–22, AGU Geophysical Monograph Series, 159, 2005.

J. GOLDSTEIN, R. W. SPIRO, P. H. REIFF, R. A. WOLF, B. R. SANDEL, J. W. FREEMAN et R. L. LAMBOUR, IMF-driven overshielding electric field and the origin of the plasmaspheric shoulder of May 24, 2000, *Geophys. Res. Lett.*, *29*, 1819, doi:10.1029/2001GL014534, 2002.

J. GOLDSTEIN, B. R. SANDEL, W. T. FORRESTER et P. H. REIFF, IMF-driven plasmasphere erosion of 10 July 2000, *Geophys. Res. Lett.*, *30*, 1146, doi:10.1029/2002GL016478, 2003*a*.

J. GOLDSTEIN, M. SPASOJEVIĆ, P. H. REIFF, B. R. SANDEL, W. T. FORRESTER, D. L. GALLAGHER et B. W. REINISCH, Identifying the plasmapause in IMAGE EUV data using IMAGE RPI in situ steep density gradients, *J. Geophys. Res.*, *108*, 1147, doi: 10.1029/2002JA009475, 2003*b*.

J. GOLDSTEIN, B. R. SANDEL, M. F. THOMSEN, M. SPASOJEVIĆ et P. H. REIFF, Simultaneous remote sensing and in situ observations of plasmaspheric drainage plumes, *J. Geophys. Res.*, *109*, A03 202, doi:10.1029/2003JA010281, 2004.

J. M. GREBOWSKY, Model study of plasmapause motion, *J. Geophys. Res.*, *75*, 4329–4333, 1970.

J. L. GREEN et S. A. BOARDSEN, Confinement of nonthermal continuum radiation to low latitudes, *J. Geophys. Res.*, *104*, 10 307–10 316, 1999.

J. L. GREEN, B. R. SANDEL, S. F. FUNG, D. L. GALLAGHER et B. W. REINISCH, On the origin of kilometric continuum, *J. Geophys. Res.*, *107*, 1105, doi:10.1029/2001JA000193, 2002.

J. L. GREEN, S. BOARDSEN, S. F. FUNG, H. MATSUMOTO, K. HASHIMOTO, R. R. ANDERSON, B. R. SANDEL et B. W. REINISCH, Association of kilometric continuum radiation with plasmaspheric structures, *J. Geophys. Res.*, *109*, A03 203, doi:10.1029/2003JA010093, 2004.

S. GRIMALD, P. M. E. DÉCRÉAU, P. CANU, X. SURAUD, X. VALLIÈRES et F. DARROUZET, A quantitative test of Jones NTC beaming theory using Cluster constellation, *Ann. Geophys.*, soumis, 2006.

K. I. GRINGAUZ, 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.

D. A. GURNETT, R. L. HUFF et D. L. KIRCHNER, The Wide-Band Plasma Wave Investigation, *Space Sci. Rev., 79*, 195–208, 1997.

G. GUSTAFSSON, M. ANDRÉ, L. MATSON et H. KOSKINEN, On waves below the local proton gyrofrequency in auroral acceleration regions, *J. Geophys. Res., 95*, 5889–5904, 1990.

G. GUSTAFSSON, 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.

G. GUSTAFSSON, M. ANDRÉ, T. CAROZZI, A. I. ERIKSSON, C.-G. FÄLTHAMMAR, R. GRARD, G. HOLMGREN, J. A. HOLTET, N. IVCHENKO, T. KARLSSON, Y. KHOTYAINTSEV, S. KLIMOV, H. LAAKSO, P.-A. LINDQVIST, B. LYBEKK, G. MARKLUND, F. MOZER, K. MURSULA, A. PEDERSEN, B. POPIELAWSKA, S. SAVIN, K. STASIEWICZ, P. TANSKANEN, A. VAIVADS et J.-E. WAHLUND, First results of electric field and density observations by Cluster EFW based on initial months of observations, *Ann. Geophys., 19*, 1219–1240, 2001.

E. G. HARRIS, On a Plasma Sheath Separating Regions of Oppositely Directed Magnetic Field, *Il Nuevo Cimento, 23*, 115–121, 1962.

C. C. HARVEY, Spatial Gradients and the Volumetric Tensor, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, édité par G. Paschmann et P. W. Daly, pp. 307–322, ISSI Scientific Report SR-001, 1998.

H. HASEGAWA, M. FUJIMOTO, T.-D. PHAN, H. RÈME, A. BALOGH, M. W. DUNLOP, C. HASHIMOTO et R. TANDOKORO, Transport of solar wind into Earth's magnetosphere through rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices, *Nature, 430*, 755–758, 2004*a*.

H. HASEGAWA, B. U. Ö. SONNERUP, M. W. DUNLOP, A. BALOGH, S. E. HAALAND, B. KLECKER, G. PASCHMANN, B. LAVRAUD, I. DANDOURAS et H. RÈME, Reconstruction of two-dimensional magnetopause structures from Cluster observations: verification of method, *Ann. Geophys., 22*, 1251–1266, 2004*b*.

Q. HU et B. U. Ö. SONNERUP, Reconstruction of two-dimensional structures in the magnetopause: Method improvements, *J. Geophys. Res., 108*, 1011, doi:10.1029/2002JA009323, 2003.

X. HUANG, B. W. REINISCH, P. SONG, J. L. GREEN et D. L. GALLAGHER, Developing an empirical density model of the plasmasphere using IMAGE/RPI observations, *Adv. Space Res., 33*, 829–832, 2004.

D. HUBERT, C. C. HARVEY, M. ROTH et J. DE KEYSER, Electron density at the subsolar magnetopause for high magnetic shear: ISEE 1 and 2 observations, *J. Geophys. Res., 103*, 6685–6692, 1998.

B. HULTQVIST, The Swedish satellite project Viking, *J. Geophys. Res.*, *95*, 5749–5752, 1990.

A. D. JOHNSTONE, 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.

D. JONES, Terrestrial myriametric radiation from the Earth's plasmapause, *Planet. Space Sci.*, *30*, 399–410, 1982.

Y. KASAHARA, T. HOSODA, T. MUKAI, S. WATANABE, I. KIMURA, H. KOJIMA et R. NIITSU, ELF/VLF waves correlated with transversely accelerated ions in the auroral region observed by Akebono, *J. Geophys. Res.*, *106*, 21 123–21 136, 2001.

H. LAAKSO 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.

G. S. LAKHINA, B. T. TSURUTANI, H. KOJIMA et H. MATSUMOTO, "Broadband" plasma waves in the boundary layers, *J. Geophys. Res.*, *105*, 27 791–27 831, 2000.

K. R. LANG, éd., *The Cambridge Guide to the Solar System*, 468 pp., Cambridge University Press, New York, 2003.

L. J. LANZEROTTI, D. C. WEBB et C. W. ARTHUR, Geomagnetic Field Fluctuations at Synchronous Orbit, 2. Radial Diffusion, *J. Geophys. Res.*, *83*, 3866–3870, 1978.

M. J. LEDOCQ, D. A. GURNETT et R. R. ANDERSON, Electron number density fluctuations near the plasmapause observed by the CRRES spacecraft, *J. Geophys. Res.*, *99*, 23 661–23 671, 1994.

L. C. LEE, 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.

J. LEMAIRE et M. ROTH, Penetration of solar wind plasma elements into the magnetosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *40*, 331–335, 1978.

J. LEMAIRE et M. ROTH, Non-steady-state solar-wind-magnetosphere interaction, *Space Sci. Rev.*, *57*, 59–108, 1991.

J. F. LEMAIRE, The "Roche-limit" of ionospheric plasma and the formation of the plasmapause, *Planet. Space Sci.*, *22*, 757–766, 1974.

J. F. LEMAIRE, The mechanisms of formation of the plasmapause, *Ann. Geophys.*, *31*, 175–190, 1975.

J. F. LEMAIRE, Impulsive penetration of filamentary plasma elements into the magnetospheres of the Earth and Jupiter, *Planet. Space Sci., 25*, 887–890, 1977.

J. F. LEMAIRE, Frontiers of the plasmasphere, *Aeronomica Acta, A 298*, Editions Cabay, Louvain–la–Neuve, 1985.

J. F. LEMAIRE, Plasma distribution models in a rotating magnetic dipole and refilling plasmaspheric flux tubes, *Phys. Fluids, 32*, 1519–1527, 1989.

J. F. LEMAIRE, The formation plasmaspheric tails, *Phys. Chem. Earth (C), 25*, 9–17, 2000.

J. F. LEMAIRE, The formation of the light-ion-trough and peeling off the plasmasphere, *J. Atmos. Terr. Phys., 63*, 1285–1291, 2001.

J. F. LEMAIRE et K. I. GRINGAUZ, éds., *The Earth's Plasmasphere*, 372 pp., Cambridge University Press, New York, 1998.

A. MARCHAUDON, J.-C. CERISIER, J.-M. BOSQUED, M. W. DUNLOP, J. A. WILD, P. M. E. DÉCRÉAU, M. FÖRSTER, D. FONTAINE et H. LAAKSO, Transient plasma injections in the dayside magnetosphere: one-to-one correlated observations by Cluster and SuperDARN, *Ann. Geophys., 22*, 141–158, 2004.

A. MASSON, U. S. INAN, H. LAAKSO, O. SANTOLÍK et P. DÉCRÉAU, Cluster observations of mid-latitude hiss near the plasmapause, *Ann. Geophys., 22*, 2565–2575, 2004.

H. MATSUI, J. M. QUINN, R. B. TORBERT, V. K. JORDANOVA, W. BAUMJOHANN, P. A. PUHL-QUINN et G. PASCHMANN, Electric field measurements in the inner magnetosphere by Cluster EDI, *J. Geophys. Res., 108*, 1352, doi:10.1029/2003JA009913, 2003.

H. MATSUI, V. K. JORDANOVA, J. M. QUINN, R. B. TORBERT et G. PASCHMANN, Derivation of electric potential patterns in the inner magnetosphere from Cluster EDI data: Initial results, *J. Geophys. Res., 109*, A10 202, doi:10.1029/2003JA010319, 2004.

C. E. MCILWAIN, Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles, *J. Geophys. Res., 66*, 3681–3691, 1961.

C. E. MCILWAIN, A Kp dependent equatorial electric field model, *Adv. Space Res., 6(3)*, 187–197, 1986.

S. B. MENDE, H. HEETDERKS, H. U. FREY, M. LAMPTON, S. P. GELLER, S. HABRAKEN, E. RENOTTE, C. JAMAR, P. ROCHUS, J. SPANN, S. A. FUSELIER, J.-C. GERARD, R. GLADSTONE, S. MURPHREE et L. COGGER, Far Ultraviolet Imaging from the IMAGE Spacecraft: 1. System Design, *Space Sci. Rev., 91*, 243–270, 2000.

N. P. MEREDITH, R. B. HORNE et R. R. ANDERSON, Substorm dependence of chorus amplitudes: Implications for the acceleration of electrons to relativistic energies, *J. Geophys. Res., 106*, 13 165–13 178, 2001.

N. P. MEREDITH, R. B. HORNE, R. M. THORNE et R. R. ANDERSON, Favored regions for chorus-driven electron acceleration to relativistic energies in the Earth's outer radiation belt, *Geophys. Res. Lett., 30*, 1871, doi:10.1029/2003GL017698, 2003.

N. P. MEREDITH, R. B. HORNE, R. M. THORNE, D. SUMMERS et R. R. ANDERSON, Substorm dependence of plasmaspheric hiss, *J. Geophys. Res., 109*, A06 209, doi:10.1029/2004JA010387, 2004.

D. G. MITCHELL, S. E. JASKULEK, C. E. SCHLEMM, E. P. KEATH, R. E. THOMPSON, B. E. TOSSMAN, J. D. BOLDT, J. R. HAYES, G. B. ANDREWS, N. PASCHALIDIS, D. C. HAMILTON, R. A. LUNDGREN, E. O. TUMS, P. WILSON, H. D. VOSS, D. PRENTICE, K. C. HSIEH, C. C. CURTIS et F. R. POWELL, High Energy Neutral Atom (HENA) Imager for the IMAGE Mission, *Space Sci. Rev., 91*, 67–112, 2000.

M. B. MOLDWIN, M. F. THOMSEN, S. J. BAME, D. MCCOMAS et G. D. REEVES, The fine-scale structure of the outer plasmasphere, *J. Geophys. Res., 100*, 8021–8030, 1995.

M. B. MOLDWIN, J. HOWARD, J. SANNY, J. D. BOCCHICCHIO, H. K. RASSOUL et R. R. ANDERSON, Plasmaspheric plumes: CRRES observations of enhanced density beyond the plasmapause, *J. Geophys. Res., 109*, A05 202, doi:10.1029/2003JA010320, 2004.

T. E. MOORE, D. J. CHORNAY, M. R. COLLIER, F. A. HERRERO, J. JOHNSON, M. A. JOHNSON, J. W. KELLER, J. F. LAUDADIO, J. F. LOBELL, K. W. OGILVIE, P. ROZMARYNOWSKI, S. A. FUSELIER, A. G. GHIELMETTI, E. HERTZBERG, D. C. HAMILTON, R. LUNDGREN, P. WILSON, P. WALPOLE, T. M. STEPHEN, B. L. PEKO, B. VAN ZYL, P. WURZ, J. M. QUINN et G. R. WILSON, The Low Energy Neutral Atom Imager for IMAGE, *Space Sci. Rev., 91*, 155–195, 2000.

O. MOULLARD, A. MASSON, H. LAAKSO, M. PARROT, P. M. E. DÉCRÉAU, O. SANTOLÍK et M. ANDRÉ, Density modulated whistler mode emissions observed near the plasmapause, *Geophys. Res. Lett., 29*, 1975, doi:10.1029/2002GL015101, 2002.

N. F. NESS, The Earth's magnetic tail, *J. Geophys. Res., 70*, 2989–3005, 1965.

A. NISHIDA, Formation of plasmapause, or magnetospheric plasma knee, by combined action of magnetospheric convections and plasma escape from the tail, *J. Geophys. Res., 71*, 5669–5679, 1966.

D. M. OBER, J. L. HORWITZ, M. F. THOMSEN, R. C. ELPHIC, D. J. MCCOMAS, R. D. BELIAN et M. B. MOLDWIN, Premidnight plasmaspheric "plumes", *J. Geophys. Res., 102*, 11 325–11 334, 1997.

C. J. OWEN, M. G. G. T. TAYLOR, I. C. KRAUKLIS, A. N. FAZAKERLEY, M. W. DUNLOP et J.-M. BOSQUED, Cluster observations of surface waves on the dawn flank magnetopause, *Ann. Geophys., 22*, 971–983, 2004.

H. OYA, Dynamical variation of plasmasphere revealed by PWS data onboard the Akebono (EXOS-D) satellite, *J. Geomag. Geoelectr., 49*, s159–s178, 1997.

E. N. PARKER, Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields, *Astrophys. J., 128*, 664, 1958.

M. PARROT, World map of ELF/VLF emissions as observed by a low-orbiting satellite, *Ann. Geophys., 8*, 135–146, 1990.

M. PARROT, O. SANTOLÍK, D. A. GURNETT, J. S. PICKETT et N. CORNILLEAU-WEHRLIN, Characteristics of magnetospherically reflected chorus waves observed by CLUSTER, *Ann. Geophys., 22*, 2597–2606, 2004.

M. PARROT, D. BENOIST, J. J. BERTHELIER, J. BLECKI, Y. CHAPUIS, F. COLIN, F. ELIE, P. FERGEAU, D. LAGOUTTE, F. LEFEUVRE, C. LEGENDRE, M. LÉVÊQUE, J. L. PINÇON, B. POIRIER, H.-C. SERAN et P. ZAMORA, The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results, *Planet. Space Sci., 54*, 441–455, 2006.

G. PASCHMANN et P. W. DALY, éds., *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, 485 pp., ISSI Scientific Report SR-001, 1998.

G. PASCHMANN, B. SONNERUP, I. PAPAMASTORAKIS, W. BAUMJOHANN, N. SCKOPKE et H. LÜHR, The magnetopause and boundary layer for small magnetic shear: Convection electric fields and reconnection, *Geophys. Res. Lett., 17*, 1829–1832, 1990.

G. PASCHMANN, 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.

G. PASCHMANN, J. M. QUINN, R. B. TORBERT, H. VAITH, C. E. MCILWAIN, G. HAERENDEL, O. H. BAUER, T. BAUER, W. BAUMJOHANN, W. FILLIUS, M. FÖRSTER, S. FREY, E. GEORGESCU, S. S. KERR, C. A. KLETZING, H. MATSUI, P. PUHL-QUINN et E. C. WHIPPLE, The Electron Drift Instrument on Cluster: overview of first results, *Ann. Geophys., 19*, 1273–1288, 2001.

A. PEDERSEN, Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements, *Ann. Geophys., 13*, 118–129, 1995.

A. PEDERSEN, 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.

A. PEDERSEN, P. DÉCRÉAU, C. P. ESCOUBET, G. GUSTAFSSON, H. LAAKSO, P.-A. LINDQVIST, B. LYBEKK, A. MASSON, F. MOZER et A. VAIVADS, Four-point high resolution information on electron densities by the electric field experiments (EFW) on Cluster, *Ann. Geophys., 19*, 1483–1489, 2001.

S. PERRAUT, A. ROUX, F. DARROUZET, C. de VILLEDARY, M. MOGILEVSKY et F. LEFEUVRE, ULF waves measurements onboard the Interball auroral probe, *Ann. Geophys., 16*, 1105–1116, 1998.

V. PIERRARD et J. CABRERA, Comparisons between EUV/IMAGE observations and numerical simulations of the plasmapause formation, *Ann. Geophys., 23*, 2635–2646, 2005.

V. PIERRARD et J. F. LEMAIRE, Development of shoulders and plumes in the frame of the interchange instability mechanism for plasmapause formation, *Geophys. Res. Lett., 31*, L05 809, doi:10.1029/2003GL018919, 2004.

C. J. POLLOCK, K. ASAMURA, J. BALDONADO, M. M. BALKEY, P. BARKER, J. L. BURCH, E. J. KORPELA, J. CRAVENS, G. DIRKS, M.-C. FOK, H. O. FUNSTEN, M. GRANDE, M. GRUNTMAN, J. HANLEY, J.-M. JAHN, M. JENKINS, M. LAMPTON, M. MARCKWORDT, D. J. MCCOMAS, T. MUKAI, G. PENEGOR, S. POPE, S. RITZAU, M. L. SCHATTENBURG, E. SCIME, R. SKOUG, W. SPURGEON, T. STECKLEIN, S. STORMS, C. URDIALES, P. VALEK, J. T. M. VAN BEEK, S. E. WEIDNER, M. WÜEST, M. K. YOUNG et C. ZINSMEYER, Medium Energy Neutral Atom (MENA) Imager for the IMAGE Mission, *Space Sci. Rev., 91*, 113–154, 2000.

J. L. RAUCH, X. SURAUD, P. M. E. DÉCRÉAU, J. G. TROTIGNON, R. LEDÉE, G. LEMERCIER, F. EL-LEMDANI MAZOUZ, S. GRIMALD, G. BOZAN, X. VALLIÈRES, P. CANU et F. DARROUZET, Automatic determination of the plasma frequency using image processing on WHISPER data, *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5^{th} Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598*, Janvier 2006.

B. W. REINISCH, D. M. HAINES, K. BIBL, G. CHENEY, I. A. GALKIN, X. HUANG, S. H. MYERS, G. S. SALES, R. F. BENSON, S. F. FUNG, J. L. GREEN, S. BOARDSEN, W. W. L. TAYLOR, J.-L. BOUGERET, R. MANNING, N. MEYER-VERNET, M. MONCUQUET, D. L. CARPENTER, D. L. GALLAGHER et P. REIFF, The Radio Plasma Imager Investigation on the IMAGE Spacecraft, *Space Sci. Rev., 91*, 319–359, 2000.

B. W. REINISCH, X. HUANG, P. SONG, G. S. SALES, S. F. FUNG, J. L. GREEN, D. L. GALLAGHER et V. M. VASYLIUNAS, Plasma Density Distribution Along the Magnetospheric Field: RPI Observations From IMAGE, *Geophys. Res. Lett., 28*, 4521–4524, doi: 10.1029/2001GL013684, 2001.

H. RÈME, 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. GHIELMETTI, 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.

H. RÈME, C. AOUSTIN, J. M. BOSQUED, I. DANDOURAS, B. LAVRAUD, J. A. SAUVAUD, A. BARTHE, J. BOUYSSOU, Th. CAMUS, O. COEUR-JOLY, A. CROS, J. CUVILO, F. DUCAY, Y. GARBAROWITZ, J. L. MÉDALE, E. PENOU, H. PERRIER, D. ROMEFORT, J. ROUZAUD, C. VALLAT, D. ALCAYDÉ, C. JACQUEY, C. MAZELLE, C. D'USTON, E. MÖBIUS, L. M. KISTLER, K. CROCKER, M. GRANOFF, C. MOUIKIS, M. POPECKI, M. VOSBURY, B. KLECKER, D. HOVESTADT, H. KUCHAREK, E. KUENNETH, G. PASCHMANN, M. SCHOLER, N. SCKOPKE, E. SEIDENSCHWANG, C. W. CARLSON, D. W. CURTIS, C. INGRAHAM, R. P. LIN, J. P. MCFADDEN, G. K. PARKS, T. PHAN, V. FORMISANO, E. AMATA, M. B. BAVASSANO-CATTANEO, P. BALDETTI, R. BRUNO, G. CHIONCHIO, A. DI LELLIS, M. F. MARCUCCI, G. PALLOCCHIA, A. KORTH, P. W. DALY, B. GRAEVE, H. ROSENBAUER, V. VASYLIUNAS, M. MCCARTHY, M. WILBER, L. ELIASSON, R. LUNDIN, S. OLSEN, E. G. SHELLEY, S. FUSELIER, A. G. GHIELMETTI, W. LENNARTSSON, C. P. ESCOUBET, H. BALSIGER, R. FRIEDEL, J-B. CAO, R. A. KOVRAZHKIN, I. PAPAMASTORAKIS, R. PELLAT, J. SCUDDER et B. SONNERUP, First multi-spacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) Experiment, *Ann. Geophys., 19*, 1303–1354, 2001.

W. RIEDLER, 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.

P. ROBERT, ROCOTLIB: A Coordinate Transformation Library for Solar-Terrestrial Studies, *1.8*, `http://cdpp.cesr.fr`, 2003.

P. ROBERT, A. ROUX, C. C. HARVEY, M. W. DUNLOP, P. W. DALY et K.-H. GLASSMEIER, Tetrahedron Geometric Factors, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, édité par G. Paschmann et P. W. Daly, pp. 323–348, ISSI Scientific Report SR-001, 1998.

E. C. ROELOF et A. J. SKINNER, Extraction of ion distributions from magnetospheric ENA and EUV images, *Space Sci. Rev., 91*, 437–459, 2000.

C. T. RUSSELL, The structure of the magnetopause, *Planet. Space Sci., 51*, 731–744, 2003.

C. T. RUSSELL, M. M. MELLOTT, E. J. SMITH et J. H. KING, Multiple spacecraft observations of interplanetary shocks: Four spacecraft determination of shock normals, *J. Geophys. Res., 88*, 4739–4748, 1983.

B. R. SANDEL, A. L. BROADFOOT, C. C. CURTIS, R. A. KING, T. C. STONE, R. H. HILL, J. CHEN, O. H. W. SIEGMUND, R. RAFFANTI, D. D. ALLRED, R. S. TURLEY et D. L.

GALLAGHER, The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission, *Space Sci. Rev., 91*, 197–242, 2000.

B. R. SANDEL, R. A. KING, W. T. FORRESTER, D. L. GALLAGHER, A. L. BROADFOOT et C. C. CURTIS, Initial Results from the IMAGE Extreme Ultraviolet Imager, *Geophys. Res. Lett., 28*, 1439–1442, 2001.

B. R. SANDEL, J. GOLDSTEIN, D. L. GALLAGHER et M. SPASOJEVIĆ, Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere, *Space Sci. Rev., 109*, 25–46, 2003.

O. SANTOLÍK et D. A. GURNETT, Transverse dimensions of chorus in the source region, *Geophys. Res. Lett., 30*, 1031, doi:10.1029/2002GL016178, 2003.

O. SANTOLÍK, D. A. GURNETT et J. S. PICKETT, Multipoint investigation of the source region of storm-time chorus, *Ann. Geophys., 22*, 2555–2563, 2004.

J.-A. SAUVAUD, C. JACQUEY, T. BEUTIER, C. OWEN, R. P. LEPPING, C. T. RUSSELL et R. J. BELIAN, Large Scale Dynamics of the Magnetospheric Tail Induced by Substorms: AMmultisatellite Study, *J. Geomag. Geoelectr., 48*, 675–686, 1996.

D. M. SAWYER et J. I. VETTE, AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum, *NSSDC/WDC-A-R&S, Report 76-06*, 1976.

N. SCKOPKE, G. PASCHMANN, G. HAERENDEL, B. U. Ö. SONNERUP, S. J. BAME, T. G. FORBES, E. W. J. HONES et C. T. RUSSELL, Structure of the low-latitude boundary layer, *J. Geophys. Res., 86*, 2099–2110, 1981.

B. W. SHEELEY, M. B. MOLDWIN, H. K. RASSOUL et R. R. ANDERSON, An empirical plasmasphere and trough density model: CRRES observations, *J. Geophys. Res., 106*, 25 631–25 641, 2001.

N. SINGH, Refilling of a plasmaspheric flux tube: microscopic plasma processes, in *Modeling Magnetospheric Plasma*, édité par T. E. Moore et J. H. Waite, pp. 87–99, AGU Geophysical Monograph Series, 44, 1988.

N. SINGH et J. L. HORWITZ, Plasmaspheric refilling: Recent observations and modelling, *J. Geophys. Res., 97*, 1049–1079, 1992.

M. SPASOJEVIĆ, 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.

M. SPASOJEVIĆ, H. U. FREY, M. F. THOMSEN, S. A. FUSELIER, S. P. GARY, B. R. SANDEL et U. S. INAN, The link between a detached subauroral proton arc and a plasmaspheric plume, *Geophys. Res. Lett., 31*, L04 803, doi:10.1029/2003GL018389, 2004.

R. W. SPIRO, M. HAREL, R. A. WOLF et P. H REIFF, Quantitative simulation of a magnetospheric substorm, 3. Plasmaspheric electric fields and evolution of the plasmapause, *J. Geophys. Res., 86*, 2261–2272, 1981.

M. SUGIURA, Hourly values of equatorial Dst for IGY, *Ann. Int. Geophys. Year, 35*, 945–948, 1964.

H. A. Jr. TAYLOR, J. M. GREBOWSKY et W. J. WALSH, Structured Variations of the Plasmapause: Evidence of a corotating plasma tail, *J. Geophys. Res., 76*, 6806–6814, 1971.

M. G. G. T. TAYLOR, M. W. DUNLOP, B. LAVRAUD, A. VONTRAT-REBERAC, C. J. OWEN, P. DÉCRÉAU, P. TRÁVNÍCEK, R. C. ELPHIC, R. H. W. FRIEDEL, J. P. DEWHURST, Y. WANG, A. FAZAKERLEY, A. BALOGH, H. RÈME et P. W. DALY, Cluster observations of a complex high-altitude cusp passage during highly variable IMF, *Ann. Geophys., 22*, 3707–3719, 2004.

W. K. TOBISKA, T. WOODS, F. EPARVIER, R. VIERECK, L. FLOYD, D. BOUWER, G. ROTTMAN et O. R. WHITE, The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool, *J. Atmos. Terr. Phys., 62*, 1233–1250, 2000.

J. G. TROTIGNON, P. M. E. DÉCRÉAU, J. L. RAUCH, O. RANDRIAMBOARISON, V. KRASNOSELS'KIKH, P. CANU, H. ALLEYNE, K. YEARBY, E. LE GUIRRIEC, H. C. SÉRAN, F. X. SENÉ, Ph. MARTIN, M. LÉVÊQUE et P. FERGEAU, 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.

J. G. TROTIGNON, 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.

B. T. TSURUTANI et E. J. SMITH, Two types of magnetospheric ELF chorus and their substorm dependences, *J. Geophys. Res., 82*, 5112–5128, 1977.

N. A. TSYGANENKO 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.

C. VALLAT, I. DANDOURAS, M. DUNLOP, A. BALOGH, E. LUCEK, G. K. PARKS, M. WILBER, E. C. ROELOF, G. CHANTEUR et H. RÈME, First current density measurements in the ring current region using simultaneous multi-spacecraft CLUSTER-FGM data, *Ann. Geophys., 23*, 1849–1865, 2005.

J. I. VETTE, The AE-8 Trapped Electron Model Environment, *NSSDC/WDC-A-R&S, Report 91-24*, 1991.

D. W. WALTHOUR, B. U. Ö. SONNERUP, R. C. ELPHIC et C. T. RUSSELL, Double vision: Remote sensing of a flux transfer event with ISEE 1 and 2, *J. Geophys. Res., 99*, 8555–8564, 1994.

L. A. WEISS, R. L. LAMBOUR, R. C. ELPHIC et M. F. THOMSEN, Study of plasmaspheric evolution using geosynchronous observations and global modeling, *Geophys. Res. Lett.*, *24*, 599–602, 1997.

W. I. WILKEN, B. AND AXFORD, I. DAGLIS, P. DALY, W. GÜTTLER, W. H. IP, A. KORTH, G. KREMSER, 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.

L. J. C. WOOLLISCROFT, 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.

Table des Figures

Partie I — Contexte Général

1.1 Champ magnétique dipolaire de la Terre 7
1.2 Champ magnétique de la Terre non dipolaire 8
1.3 Magnétosphère de la Terre 9
1.4 Ovale auroral dans l'hémisphère Nord 10
1.5 Vue générale de la plasmasphère 11

2.1 Lancement des deux premiers satellites CLUSTER 13
2.2 Distance de séparation moyenne entre les quatre satellites CLUSTER 14
2.3 Orbite de CLUSTER avec apogée côté jour, puis côté nuit 15
2.4 Précession de l'orbite des quatre satellites CLUSTER durant une année 16
2.5 Positionnement des instruments ondes STAFF, EFW, DWP, WHISPER, WBD sur un satellite CLUSTER 17
2.6 Positionnement d'un deuxième groupe d'instruments, les analyseurs de particules PEACE, CIS, RAPID, sur un satellite CLUSTER 17
2.7 Positionnement d'un troisième groupe d'instruments, FGM, EDI, ASPOC sur un satellite CLUSTER 18
2.8 Croquis simplifié de fonctionnement de l'instrument WHISPER en mode passif 19
2.9 Croquis simplifié de fonctionnement de l'instrument WHISPER en mode actif . 19
2.10 Spectrogrammes temps-fréquence du champ électrique enregistrés par WHISPER à bord de C4 le 26 Février 2001 20

3.1 Orbite du satellite IMAGE 23
3.2 Schéma de l'instrument EUV 24
3.3 Structures observées par l'instrument EUV à bord du satellite IMAGE 25

4.1 Description du modèle basé sur le mécanisme d'instabilité d'interchange 30
4.2 Champ électrique déterminé par le modèle de McIlwain E5D 31

Partie II — Outils d'Analyse

6.1 Gradient de densité d'une frontière modélisée le 26 Février 2001 44
6.2 Gradient de densité d'une frontière modélisée le 26 Février 2001 45
6.3 Gradient de densité d'une frontière modélisée le 26 Février 2001 46
6.4 Gradient de densité d'une structure ondulatoire le 26 Février 2001 48
6.5 Gradient de densité d'une structure ondulatoire le 26 Février 2001 49

6.6 Gradient de densité d'une structure ondulatoire le 26 Février 2001 50
6.7 Gradient de densité d'une bulle de densité suivant le modèle de Harris le 13 Janvier 2000 51
6.8 Orbite des satellites CLUSTER durant la traversée d'une onde de plasma le 22 Décembre 2000 53
6.9 Gradient de densité d'une structure ondulatoire le 22 Décembre 2000 53
6.10 Gradient de densité d'une structure ondulatoire après filtrage le 22 Décembre 2000 54
6.11 Spectrogramme temps-fréquence WHISPER pour le 16 Novembre 2001 55
6.12 Gradient de densité le 16 Novembre 2001 56
6.13 Orbite des satellites CLUSTER durant la traversée de la magnétopause le 12 Décembre 2000 56
6.14 Spectrogramme WHISPER pour le 12 Décembre 2000 57
6.15 Gradient de densité durant la traversée de la magnétopause le 12 Décembre 2000 58

7.1 Représentation schématique d'une frontière plane P traversant les quatre satellites CLUSTER disposés en tétraèdre 59
7.2 Profils de le fréquence plasma déterminés par WHISPER le 26 Février 2001 . . 60
7.3 Gradient de densité d'une structure de densité traversée le 26 Février 2001 . . . 61
7.4 Gradient de densité d'une structure de densité et de la magnétopause traversées le 26 Février 2001 62
7.5 Orientation des structures de densité traversées par les satellites CLUSTER le 26 Février 2001 63
7.6 Orbite des satellites CLUSTER durant la traversée de la magnétopause le 2 mars 2002 63
7.7 Spectrogrammes WHISPER pour le 2 Mars 2002 64
7.8 Gradient de densité durant la traversée de la magnétopause le 2 Mars 2002 . . . 65
7.9 Profil de densité de la magnétopause en fonction de la distance à cette frontière, le 2 Mars 2002 66

8.1 Spectrogramme temps-fréquence de l'instrument V4H à bord du satellite Viking le 10 Septembre 1986 69
8.2 Indice d'activité géomagnétique K_p durant les 10 mois de cette étude 69
8.3 Distribution en temps magnétique local (MLT) et latitude invariante (InvLat) durant les 10 mois de cette étude 70
8.4 Histogramme de la densité spectrale de puissance à l'intérieur d'une boite statistique 71
8.5 Densités de puissance spectrale du champ électrique VLF en fonction de la fréquence et moyennées sur l'ensemble des temps magnétiques locaux 71
8.6 Densités de puissance spectrale du champ électrique VLF en fonction de la fréquence et moyennées sur l'ensemble des latitudes invariantes 72
8.7 Densités de puissance spectrale du champ électrique VLF en fonction de la latitude invariante et de l'altitude 73

Partie III — Plasmasphère

10.1 Position de la plasmapause 80
10.2 Epaisseur de la plasmapause 81
10.3 Statistiques sur les structures de densité à petite échelle pour tous les K_p possibles 82
10.4 Statistiques sur les structures de densité à petite échelle dans le cas où $K_p \leq 2^+$ 83
10.5 Statistiques sur les structures de densité à petite échelle dans le cas où $K_p > 2^+$ 84

11.1 Projection de l'orbite du satellite C3 durant la traversée du 7 Août 2003 88
11.2 Spectrogrammes déterminés par WHISPER à bord des quatre satellites CLUSTER le 7 Août 2003 89
11.3 Gradient de densité entre 07:00 et 08:00 UT le 7 Août 2003 90
11.4 Gradient de la magnitude du champ magnétique entre 07:00 et 09:00 UT le 7 Août 2003 91
11.5 Croquis expliquant les angles α_{BB} et α_{BN}, qui décrivent l'orientation des gradients spatiaux 92
11.6 Croquis expliquant les angles θ et ϕ, qui décrivent l'orientation des gradients spatiaux 92
11.7 Divers paramètres en fonction du temps durant la traversée de la plasmasphère du 7 Août 2003 94
11.8 Croquis de la traversée de la plasmasphere du 7 Août 2003 entre 07:15 et 08:45 UT 95

12.1 Profils de densité déterminés par WHISPER le 11 Avril 2002 98
12.2 Gradient de densité d'une structure de densité à petite échelle le 11 Avril 2002 . 99

13.1 Projection de l'orbite du satellite C1 durant la traversée de plasmasphère du 7 Mai 2002 102
13.2 Spectrogrammes WHISPER durant la traversée de la plasmasphère du 7 Mai 2002 103
13.3 Densité électronique du panache déterminé par les quatre instruments WHISPER pour le 7 Mai 2002 104
13.4 Spectrogrammes temps-énergie de l'instrument CIS en mode RPA durant la traversée entrante de la plasmasphère du 7 Mai 2002 105
13.5 Vitesse de dérive électronique mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique pour la traversée de la plasmasphère du 7 Mai 2002 106
13.6 Différentes quantités représentées en fonction du temps durant la traversée du panache du 7 Mai 2002 108
13.7 Projection d'une image EUV dans le plan équatorial magnétique à 08:31 UT le 7 Mai 2002 109
13.8 Simulation numérique donnant la position de la plasmapause le 7 Mai 2002 . . 111
13.9 Simulation numérique donnant la position de la plasmapause le 7 Mai 2002 à 08:30 UT 112
13.10 Projection de l'orbite du satellite C1 durant la traversée de plasmasphère du 2 Juin 2002 113

13.11 Spectrogrammes WHISPER durant la traversée de la plasmasphère du 2 Juin 2002 114
13.12 Densité électronique du panache déterminée par les quatre instruments WHISPER pour le 2 Juin 2002 116
13.13 Spectrogrammes temps-énergie de l'instrument CIS en mode RPA durant toute la traversée de la plasmasphère du 2 Juin 2002 117
13.14 Vitesse de dérive électronique mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique pour la traversée entrante du panache du 2 Juin 2002 119
13.15 Vitesse de dérive électronique mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique pour la traversée sortante du panache du 2 Juin 2002 120
13.16 Projection d'une image EUV dans le plan équatorial magnétique à 12:33 UT le 2 Juin 2002 121
13.17 Simulation numérique donnant la position de la plasmapause le 2 Juin 2002 . . 122
13.18 Simulation numérique donnant la position de la plasmapause le 2 Juin 2002 à 12:30 UT 123
13.19 Projection de l'orbite du satellite C1 durant la traversée du 11 Avril 2002 124
13.20 Spectrogrammes WHISPER durant la traversée de la plasmasphère du 11 Avril 2002 125
13.21 Densité électronique du panache déterminée par les quatre instruments WHISPER pour le 11 Avril 2002 126
13.22 Spectrogrammes temps-énergie de l'instrument CIS en mode RPA durant toute la traversée de la plasmasphère du 11 Avril 2002 127
13.23 Vitesse de dérive électronique mesurée par EDI et projetée dans le plan équatorial magnétique pour la traversée de la plasmasphère du 11 Avril 2002 128
13.24 Différentes quantités représentées en fonction du temps durant la traverséee entrante du panache le 11 Avril 2002 129
13.25 Différentes quantités représentées en fonction du temps durant la traverséee sortante du panache le 11 Avril 2002 130
13.26 Projection de deux images EUV dans le plan équatorial magnétique à 04:31 UT et 06:14 UT le 11 Avril 2002 131
13.27 Simulation numérique donnant la position de la plasmapause le 7 Mai 2002 . . 132

A.1 Système de coordonnées GEO 147
A.2 Système de coordonnées GSE 148
A.3 Système de coordonnées SM 148

C.1 Croquis de la projection d'un vecteur vitesse dans le plan équatorial magnétique le long des lignes de champ magnétique 153

D.1 Définitions de trois vecteurs vitesse dans le plan équatorial magnétique: V_{N-eq}, V_{P-eq} et V_{R-eq} 156

Liste des Tableaux

Partie I — Contexte Général

Partie II — Outils d'Analyse

Partie III — Plasmasphère

13.1 Comparaison entre WHISPER et EUV concernant la distance radiale à l'équateur en R_E du panache 133
13.2 Comparaison entre WHISPER, EUV et les simulations numériques concernant la position en MLT du panache 134
13.3 Comparaison entre WHISPER, EUV et les simulations numériques concernant la position de la plasmapause 134
13.4 Résumé des différents types de vitesse utilisées dans l'analyse des panaches plasmasphériques 135
13.5 Directions normales et vitesses normales de frontières déterminées à partir de WHISPER 135
13.6 Vitesses de dérive électronique mesurées par EDI et vitesses de co-rotation projetées dans le plan équatorial magnétique 136

Table des Matières

Résumé **v**

Abstract **vii**

Introduction **1**

Partie I — Contexte Général

1 La Magnétosphère Terrestre **7**
1.1 Généralités 7
1.2 La magnétogaine et la magnétopause 8
1.3 Les zones aurorales 10
1.4 La plasmasphère et la plasmapause 11

2 La Mission CLUSTER **13**
2.1 Généralités 13
2.2 Distance de séparation entre les satellites et configuration du tétraèdre 14
2.3 Instruments 16
2.3.1 L'instrument WHISPER 18
2.3.2 L'instrument EFW 20
2.3.3 L'instrument CIS 21
2.3.4 L'instrument EDI 21
2.3.5 L'instrument FGM 21

3 Autres Missions **23**
3.1 La mission IMAGE 23
3.1.1 Généralités 23
3.1.2 L'instrument EUV 24
3.2 La mission Viking 26
3.2.1 Généralités 26
3.2.2 L'instrument V4H 27
3.3 Les satellites LANL 27

4 Simulations Numériques de Formation de la Plasmapause **29**
4.1 Généralités 29
4.2 Description du modèle 30

Partie II — Outils d'Analyse

5 Généralités **35**
5.1 Avant la mission CLUSTER 35
5.2 Dans le cadre de la mission CLUSTER 36

6 Gradient Spatial **39**
6.1 Généralités 39
6.2 Méthode 39
6.3 Limites - Erreurs 41
6.3.1 Généralités 41
6.3.2 Calcul d'erreur 41
6.4 Exemples tests 42
6.4.1 Traversée d'une frontière 42
6.4.2 Traversée d'une onde 47
6.4.3 Traversée d'une bulle de densité suivant le modèle de Harris 51
6.5 Applications 52
6.5.1 Magnétogaine: Ondes 52
6.5.2 Magnétopause: Structure ondulatoire et orientation 55

7 Méthode des Délais **59**
7.1 Méthode 59
7.2 Applications 60
7.2.1 26 Février 2001 60
7.2.2 2 Mars 2002 62

8 Analyse Statistique **67**
8.1 Généralités - Méthode 67
8.2 Application 67
8.2.1 Introduction: Le projet SEVEM 67
8.2.2 Données de la mission Viking 68
8.2.3 Résultats statistiques 70

Partie III — Plasmasphère

9 Contexte Général **77**
9.1 Avant la mission CLUSTER 77
9.2 Résultats de la mission IMAGE 77
9.3 Résultats de la mission CLUSTER 78

10 Etude Statistique **79**
10.1 Position et épaisseur de la plasmapause 79
10.2 Structures de densité à petite échelle 81

10.3 Conclusions 85

11 Structure Globale de la Plasmasphère 87
11.1 Introduction 87
11.2 Description des données 87
11.3 Analyse globale de la plasmasphère 90
11.3.1 Gradient spatial 90
11.3.2 Définitions de différents angles 91
11.3.3 Résultats 92
11.4 Conclusions 96

12 Structure de Densité à Petite Echelle 97
12.1 11 Avril 2002 97
12.2 Conclusions 99

13 Panaches Plasmasphériques 101
13.1 7 Mai 2002 101
13.1.1 Observations avec CLUSTER 101
13.1.2 Observations avec IMAGE et LANL 107
13.1.3 Simulations numériques 110
13.2 2 Juin 2002 112
13.2.1 Observations avec CLUSTER 112
13.2.2 Observations avec IMAGE et LANL 118
13.2.3 Simulations numériques 122
13.3 11 Avril 2002 123
13.3.1 Observations avec CLUSTER 123
13.3.2 Observations avec IMAGE et LANL 128
13.3.3 Simulations numériques 132
13.4 Conclusions 133

Conclusions Générales 134
1 Outils d'analyse 139
1.1 Gradient spatial 139
1.2 Méthodes des délais 139
1.3 Analyse statistique 139
2 Plasmasphère 140
2.1 Structure à grande échelle 140
2.2 Structure à petite échelle 141

Annexes 145

A Coordonnées et Paramètres **147**
1 Système de coordonnées . . . 147
1.1 Système Géographique (GEO) . . . 147
1.2 Système Géocentrique Solaire Ecliptique (GSE) . . . 148
1.3 Système Solaire Magnétique (SM) . . . 148
2 Paramètres Magnétosphériques . . . 149
2.1 Indice d'activité géomagnétique: K_p . . . 149
2.2 Indice de perturbation géomagnétique: Dst . . . 149
2.3 Paramètre de McIlwain: L . . . 149
2.4 Latitude invariante: $InvLat$ . . . 149
2.5 Temps magnétique local: MLT . . . 150
2.6 Distance équatoriale: R_{equat} . . . 150

B Densité de Courant Electrique **151**

C Projection dans le Plan Equatorial Magnétique **153**

D Vecteurs Vitesses dans le Plan Equatorial **155**

E Articles Publiés **159**
1 Article 1 . . . 159
2 Article 2 . . . 167
3 Article 3 . . . 177
4 Article 4 . . . 201

Bibliographie **207**

Table des Figures **225**

Liste des Tableaux **229**

Table des Matières **231**

Publications et Communications **235**
1 Publications avec Comité de Lecture . . . 235
2 Autres Publications . . . 236
3 Communications Orales lors de Congrès Internationaux . . . 238
4 Communications Posters lors de Congrès Internationaux . . . 243

Publications et Communications

1 Publications avec Comité de Lecture

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., et André, M.
Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations
Ann. Geophys., 24, 1737-1758, 2006a

Darrouzet, F., De Keyser, J., Décréau, P. M. E., Lemaire, J. F., et Dunlop, M. W.
Spatial gradients in the plasmasphere from Cluster
Geophys. Res. Lett., 33, L08105, doi:10.1029/2006GL025727, 2006b

Décréau, P. M. E., Le Guirriec, E., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Canu, P., Darrouzet, F., Lemaire, J., Masson, A., Sedgemore, F., et André, M.
Density irregularities in the plasmasphere boundary player: Cluster observations in the dusk sector
Adv. Space Res., 36(10), 1964−1969, 2005

Darrouzet, F., Décréau, P. M. E., De Keyser, J., Masson, A., Gallagher, D. L., Santolik, O., Sandel, B. R., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., Le Guirriec, E., Canu, P., Sedgemore, F., André, M., et Lemaire, J. F.
Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations
Ann. Geophys., 22, 2577−2585, 2004

Décréau, P. M. E., Ducoin, C., Le Rouzic, G., Randriamboarison, O., Rauch, J. L., Trotignon, J. G., Vallières, X., Canu, P., Darrouzet, F., Gough, M. P., Buckley, A.M., et Carozzi, T. D.
Observation of Continuum radiations from the CLUSTER fleet : first results from direction finding
Ann. Geophys., 22, 2607−2624, 2004

De Keyser J., Gustafsson, G., Roth, M., Darrouzet, F., Dunlop, M., Rème, H., Fazakerley, A., Décréau, P., et Cornilleau-Wehrlin, N.
Reconstruction of the magnetopause and low latitude boundary layer topology using Cluster multi-point measurements
Ann. Geophys., 22, 2381−2389, 2004

Trotignon, J. G., Décréau, P. M. E., Rauch, J. L., Le Guirriec, E., Canu, P., et Darrouzet, F.
The Whisper Relaxation Sounder Onboard Cluster: A Powerful Tool for Space Plasma Diagnosis around the Earth
Cosmic Research, 41(4), 369−372, 2003

Darrouzet, F., Spjeldvik, W. N., Lemaire, J. F., Gustafsson, G., Hann, C., et Dyck, C.
Towards statistical and empirical models of the distribution of VLF waves at high latitude from the observations of the Viking spacecraft
Adv. Space Res., 32(3), 323−328, 2003

De Keyser, J., Darrouzet, F., et Roth, M.
Trying to bring the magnetopause to a standstill
Geophys. Res. Lett., 29(10), 1453, doi:10.1029/2002GL015001, 2002

Décréau, P. M. E., Fergeau, P., Krasnosels'kikh, V., Le Guirriec, E., Lévêque, M., Martin, Ph., Randriamboarison, O., Rauch, J. L., Sené, F. X., Séran, H. C., Trotignon, J. G., Canu, P., Cornilleau, N., de Féraudy, H,. Alleyne, H., Yearby, K., Mögensen, P. B., Gustafsson, G., André, M., Gurnett, D. C., Darrouzet, F., Lemaire, J., Harvey, C. C., Travnicek, P., et Whisper experimenters
Early results from the Whisper instrument on CLUSTER: an overview
Ann. Geophys., 19, 1241−1258, 2001

De Keyser, J., Darrouzet, F., Roth, M., Vaisberg, O. L., Rybjeva, N., Smirnov, V., Avanov, L., Nemecek, Z., et Safrankova, J.
Transients at the dawn and dusk side magnetospheric boundary: Surface waves or isolated plasma blobs?
J. Geophys. Res., 106(A11), 25503−25516, 2001

Perraut, S., Roux, A., Darrouzet, F., de Villedary, C., Mogilevsky, M., et Lefeuvre, F.
ULF waves measurements onboard the Interball auroral probe
Ann. Geophys., 16, 1105−1116, 1998

2 Autres Publications

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., et André, M.
Plasmaspheric plumes: Cluster, IMAGE and simulations
Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5^{th} Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, Janvier 2006

Dunlop, M. W., Balogh, A., Shi, Q-Q., Pu, Z., Vallat, C., Robert, P., Haaland, S., Shen, C., Davies, J. A., Glassmeier, K.-H., Cargill, P., Darrouzet, F., et Roux, A.
The Curlometer and other gradient measurements with Cluster
Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5th Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, Janvier 2006

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

Rauch, J. L., Suraud, X., Décréau, P. M. E., Trotignon, J. G., Ledée, R., Lemercier, G., El-Lemdani Mazouz, F., Grimald, S., Bozan, G., Vallières, X., Canu, P., et Darrouzet, F.
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, ESA SP-598, Janvier 2006

Trotignon, J. G., Décréau, P. M. E., Rauch, J. L., Suraud, X., Grimald, S., El-Lemdani Mazouz, F., Vallières, X., Canu, P., Darrouzet, F., et Masson, A.
The electron density around the Earth, a high level product of the Cluster/WHISPER relaxation sounder
Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium, 5th Anniversary of Cluster in Space, ESA SP-598, Janvier 2006

Darrouzet, F., De Keyser, J., Décréau, P. M. E., Gallagher, D. L., Pierrard, V., Lemaire, J. F., Dandouras, I., Matsui, H., Dunlop, M., et André, M.
Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations and numerical simulations
Physicalia Magazine, 27(4), 385−395, 2005

De Keyser, J., Darrouzet, F., Roth, M., et Pierrard, V.
The Earth system: Living in space - A Cluster perspective
Proceedings of the Contact Forum for Geodesy and Geophysics for the third Millennium in Belgium, 13 October 2005, Brussels, Arijs, E., et Ducarme, B., eds., 69−79, 2005

Darrouzet, F., et Lemaire, J.
The SEVEM project: Statistical ELF and VLF Environment Models
Le Bulletin du Centre de Données de la Physique des Plasma, N5, January 2002

Darrouzet, F., Décréau, P. M. E., et Lemaire, J.

The Cluster Mission, Preliminary Results Obtained with the WHISPER Experiment
Physicalia Magazine, 24(1), 3−16, 2002

Roth, M., De Keyser, J., Darrouzet, F., et Cadez, V.
Structure and dynamics of the Earth's magnetopause
Space Scientific Research in Belgium, II(2), 1994−2000, 81−93, 2001

Darrouzet, F., Décréau, P., et Harvey, C. C.
Analysis software for the Cluster Mission: The Spatial Gradient of Density
Space Scientific Research in Belgium, II(2), 1994−2000, 95−101, 2001

Darrouzet, F., Lemaire, J., et Orr, A.
The SEVEM Project: Statistical ELF and VLF Environment Models
Space Scientific Research in Belgium, II(2), 1994−2000, 103−107, 2001

Darrouzet, F., et Lemaire, J.
Survey of ELF and VLF Experiments in the Magnetosphere
Proceedings of the Cluster II Workshop on Multiscale/Multipoint Plasma Measurements, ESA SP-449, 307−310, 2000

3 Communications Orales lors de Congrès Internationaux

F. Darrouzet, J. De Keyser, P. M. E. Décréau, J. F. Lemaire, et M. W. Dunlop
Spatial gradients in the plasmasphere from CLUSTER
EGU, 3rd General Assembly, Vienne, Austria, 02−07 April 2006

M. Echim, H. Lamy, F. Darrouzet, J. Lemaire, P. Decreau, et M. Dunlop
Magnetic field fluctuations in the cusp studied with CLUSTER data: evidence of intermittency
AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 05−09 December 2005

F. Darrouzet, J. De Keyser, P. M. E. Décréau, J. Lemaire, M. Dunlop, J. G. Trotignon, et J. L. Rauch
Plasmaspheric density structure: Application of a four-point analysis tool, the scalar gradient
S. Grimald, P. M. E. Décréau, F. El-Lemdani Mazouz, V. Krasnosels'kikh, G. Le Rouzic, V. Lobzin, J. L. Rauch, J. G. Trotignon, X. Vallières, P. Canu, et F. Darrouzet
Non-thermal Continuum emissions observed from the Cluster constellation: statistical studies
URSI, XXVIIIth General Assembly, New Delhi, India, 23−29 October 2005

P. M. E. Décréau, S. Grimald, M. Parrot, O. Randriamboarison, J. L. Rauch, J. G. Trotignon, X. Vallières, P. Canu, N. Cornilleau, F. Darrouzet, J. Pickett, O. Santolik, M. P. Gough, A. M. Buckley, T. D. Carozzi et A. Masson
Non Thermal Continuum radiation observed from the CLUSTER fleet
10^{th} Cluster Workshop (Cluster and Double Star symposium, 5^{th} anniversary of Cluster in Space), Noordwijk, The Netherlands, 19−23 September 2005

H. Lamy, M. Echim, F. Darrouzet, J. Lemaire, P. Decreau, M. Dunlop
Magnetopause turbulence studied with CLUSTER data : evidence of intermittency
Solar-Terrestrial Interactions from Microscale to Global Models, Bucharest, Romania, 06−10 September 2005

V. Pierrard, J. Cabrera, F. Darrouzet, et J. Lemaire
Comparisons between EUV/IMAGE observations and numerical simulations of the plasmapause formation
EGU, 2^{nd} General Assembly, Vienne, Austria, 24−29 April 2005

J. L. Rauch , P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, P. Canu, F. Lemdani Mazouz, F. Darrouzet, X. Suraud, G. Le Rouzic
Determination of electron density using the active WHISPER experiment on Cluster project inside auroral zone and plasmasphere region
VIth International URSI Suzdal Symposium on "Effects of Artificial Action on the Earth Ionosphere by Powerful Radio Waves", Moscow, Russia, 19−21 October 2004

F. Darrouzet, J. De Keyser, P. M. E. Décréau, V. Pierrard, D. L. Gallagher, B. R. Sandel, J. F. Lemaire, J. Cabrera, I. Dandouras, A. Masson, P. Canu, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, M. André, et H. Matsui
Analysis of plasmaspheric plumes: Cluster and Image observations et numerical simulations
AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 13−17 December 2004

F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, J. De Keyser, V. Pierrard, I. Dandouras, D. L. Gallagher, B. R. Sandel, A. Masson, et J. Lemaire
Preliminary study on plasmaspheric plumes: Cluster and Image observations, and numerical simulations
8^{th} Cluster Workshop, New Hampshire, USA, 29 September−01 October 2004

P. Canu, P. M. E. Décréau, S. Escoffier, A. Boleve, N. Cornilleau-Wehrlin, D. Fontaine, A. Fazakerley, M. Dunlop, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, Y. Khotyaintsev, et F. Darrouzet
Observations of small scale electrostatic structures close to the magnetopause by Cluster-Whisper
COSPAR, 35^{th} Scientific Assembly, Paris, France, 18−25 July 2004

F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, J. De Keyser, V. Pierrard, I. Dandouras, D. L. Gallagher, B. R. Sandel, A. Masson, et J. Lemaire
Preliminary study on plasmaspheric plumes: Cluster and Image observations
Plasmasphere Meeting at ESA, Paris, France, 16 July 2004

F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, J. De Keyser, A. Masson, D. L. Gallagher, O. Santolik, B. R. Sandel, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, E. Le Guirriec, P. Canu, F. Sedgemore, M. Andre, et J. F. Lemaire
Density structures inside the plasmasphere: CLUSTER/IMAGE observations
IMAGE Science Working Group meeting, Liège, Belgium, 03−04 May 2004

F. Darrouzet, J. De Keyser, P. M. E. Décréau, I. Dandouras, M. Dunlop, A. Masson, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, et M. Andre
Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations
EGU, 1^{st} General Assembly, Nice, France, 25−30 April 2004

J. G. Trotignon, P. M. E. Décréau, O. Randriamboarison, J. L. Rauch, P. Canu, F. Darrouzet, J. P. Eastwood, et P. Travnicek
Radiations at Twice the Plasma Frequency Detected Upstream of the Earth's Shock by the CLUSTER/WHISPER Sounder
P. M. E. Décréau, P. Canu, J. G. Trotignon, E. Le Guirriec, G. Le Rouzic, O. Randriamboarison, J. L. Rauch, X. Vallières, S. Grimald, C. Ducoin, M. P. Gough, A. M. Buckley, T. D. Carozzi, et F. Darrouzet
Continuum Radiations Characteristics close and far from Sources: Directivity Observations from the four CLUSTER spacecraft
AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 08−12 December 2003

F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, J. F. Lemaire, J. De Keyser, A. Masson, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, E. Le Guirriec, P. Canu, F. Sedgemore, et M. Andre
Density irregularities in the plasmasphere: Cluster observations
J. De Keyser, M. Roth, et F. Darrouzet
Reconstruction of the magnetopause and low latitude boundary layer with Cluster: Ongoing work
6^{th} Cluster Workshop, Noordwijk, The Netherlands, 29 September−03 October 2003

J. L. Rauch, P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, F., Lefeuvre, M. Parrot, P. Canu, M. Moguilevsky, T. Burinskaya, F. Darrouzet, X. Vallières, et G. Le Rouzic
Observation of Z Mode on INTERBALL 2 and CLUSTER Projects and Evaluation of the Electron Density Using the Wave Propagation Characteristics
Magnetospheric Response to Solar Activity, Charles University, Prague, Czech Republic, 09−12 September 2003

F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, J. Lemaire, A. Masson, E. Le Guirriec, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, P. Canu, F. Sedgemore, et M. Andre
Multipoint observation of the boundary of the plasmasphere: Cluster observations
IUGG, XXIIIrd General Assembly, Sapporo, Japan, 30 June−11 July 2003

G. Chanteur, F. Darrouzet, P. Décréau, J. Lemaire, P. Robert, et A. Roux
Local geometry of magnetic field lines encompassed by CLUSTER: estimating the osculating plane and the radius of curvature (Invited Paper)
J. De Keyser, M. Roth, F. Darrouzet, et the Cluster CIS, FGM, et PEACE teams
Reconstruction of the magnetopause and low latitude boundary layer topology using Cluster multi-point measurements (Invited Paper)
G. Gustafsson, J. De Keyser, A. Fazakerley, B. Popielawska, K. Stasiewicz, S. Buchert, J.-E. Wahlund, T. Dudoc de Wit, R. Karlsson, M. Roth, F. Darrouzet, et A. Vaivads
Surface Wave Observations Near the Magnetopause
F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, C. C. Harvey, E. Le Guirriec, J. Soucek, A. Masson, et J. Lemaire
Gradient density vectors on CLUSTER: a simple tool for probing a complex medium (Invited Paper)
5th Cluster Workshop, STAMMS Conference, Orléans, France, 12−16 May 2003

F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, J. Lemaire, A. Masson, E. Le Guirriec, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, P. Canu, F. Sedgemore, et M. Andre
Density irregularities at the plasmapause: Cluster observations
J. De Keyser, M. Roth, et F. Darrouzet
Monitoring motion of the magnetospheric boundary and recovering its structure using single- and multi-spacecraft observations
EGS, XXVIIIth General Assembly, Nice, France, 07−11 April 2003

J. G. Trotignon, P. M. E. Décréau, O. Randriamboarison, J. L. Rauch, P. Canu, A. Balogh, J. Lemaire, F. Darrouzet, et P. Travnicek
Electron Plasma Waves Observed in the Earth's Foreshock by the CLUSTER/WHISPER Experiment
AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 10−14 December 2002

J. F. Lemaire, F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, P. Canu, O. Moullard, et A. Masson
The plasmapause region: model simulations versus WHISPER & EFW / CLUSTER observations
J. G. Trotignon, P. Canu, P. M. E. Décréau, J. L. Rauch, J. Lemaire, F. Darrouzet, E. Le Guirriec, et P. Travnicek
Electron Plasma Oscillations in the Solar Wind Upstream of the Earth's Bow Shock: CLUSTER/WHISPER Sounder Observations and Connection Calculations
URSI, XXVIIth General Assembly, Maastricht, The Netherlands, 17−24 August 2002

J. G. Trotignon, P. Canu, I. Dandouras, F. Darrouzet, P. M. E. Décréau, R. Hitier, E. Le Guirriec, J. Lemaire, J. L. Rauch, et H. Rème
Total plasma density determination in the Earth's space environment from the active and passive measurements of the CLUSTER/WHISPER experiment
J. De Keyser, M. Roth, et F. Darrouzet
Magnetopause transients as the result of boundary motion
EGS, XXVIIth General Assembly, Nice, France, 21−26 April 2002

J. De Keyser, F. Darrouzet, et M. Roth
Modeling motion of the magnetospheric boundary
2nd Cluster Workshop, Noordwijk, The Netherlands, 04−08 March 2002

M. Roth, J. De Keyser, et F. Darrouzet
Characterising surface waves at the magnetopause from multi-satellite observations: Interball-Tail/Magion-4 and Cluster II
COSPAR Colloquium, Plasma processes in the near-Earth space: Interball and beyond, Sofia, Bulgaria, 05−10 February, 2002

P. M. E. Décréau, E. Le Guirriec, O. Randriamboarison, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, P. Canu, F. Darrouzet, J. Lemaire, A. Masson, et O. Moullard
Outer plasmaspheric structures, topology and dynamics: views from the Whisper instrument on Cluster
AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 10−14 December 2001

J. G. Trotignon, P. M. E. Décréau, J. L. Rauch, E. Le Guirriec, P. Canu, et F. Darrouzet
The WHISPER relaxation sounder on board CLUSTER, a powerful tool for space plasma diagnosis around the Earth
International Symposium PLASMA-2001, Varsovie, Poland, 19−21 September 2001

P. M. E. Décréau, V. Krasnosels'kikh, E. Le Guirriec, J. L. Rauch, J. G. Trotignon, P. Canu, B. Lefèvre, F. Darrouzet, J. Lemaire, A. Balogh, M. Dunlop, et F. Sedgemore
Dayside magnetospheric boundaries observed in situ: a view from the Whisper instrument on Cluster (Invited Paper)
IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly, Hanoï, Vietnam, 19−31 August 2001

P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, V. Krasnosels'kikh, O. Randriamboarison, P. Canu, et F. Darrouzet
A Multipoint view of magnetospheric structures: first contributions from the Whisper instrument on board Cluster (Invited Paper)
Les Woolliscroft Memorial Conference: Multipoint Measurements versus Theory, Sheffield, England, 24−26 April 2001

P. M. E. Décréau, 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 (Invited Paper)
EGS, XXVIth General Assembly, Nice, France, 25−30 Mars 2001

F. Darrouzet, C. Harvey, P. Décréau, et J. Lemaire
CLUSTER II: the Density Gradient
SWT35 Cluster, Darmstadt, Germany, 28−29 November 2000

F. Darrouzet, C. Harvey, et P. Décréau
CLUSTER II: the Density Gradient
Atelier Cluster, Toulouse, France, 05−07 June 2000

J. De Keyser, F. Darrouzet, M. Roth, O. L. Vaisberg, N. Rybjeva, V. Smirnov, L. Avanov, J. Safrankova, et Z. Nemecek
Transients at the dawn and dusk side magnetospheric boundary: Surface waves or isolated plasma blobs?
EGS, XXVth General Assembly, Nice, France, 25−29 April 2000

4 Communications Posters lors de Congrès Internationaux

J. De Keyser, F. Darrouzet, M. Roth, et N. Crosby
Multi-spacecraft methods for determining spatial gradients
F. El-Lemdani Mazouz, J. L. Rauch, P. M. E. Décréau, S. Grimald, X. Suraud, X. Vallières, J. G. Trotignon, P. Canu, F. Darrouzet, A. Masson, et D. Fontaine
Electrostatic emissions at (n+1/2) fce in the plasmasphere observed by CLUSTER/WHISPER experiment: Study of two case events
EGU, 3rd General Assembly, Vienne, 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, J. G Trotignon, P. Canu, et F. Darrouzet
Observations of natural waves close to magnetic equator inside plasmasphere by WHISPER/CLUSTER
J. L. Rauch, P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, F. Lemdani Mazouz, X. Suraud, P. Canu, F. Darrouzet, F. Lefeuvre, M. Parrot, M. Mogilevsky, et T. Burinskaya
Electron density determination inside the auroral and plasmaspheric regions from Interball-2 and Cluster wave measurements
J. G. Trotignon, P. M. E. Decreau, O. Randriamboarison, J. L. Rauch, P. Canu, F. Darrouzet, G.

Le Rouzic, et S. Grimald
Radiations at Twice the Solar-Wind Plasma Frequency Upstream of the Earth's Bow Shock
URSI, XXVIIIth General Assembly, New Delhi, India, 23−29 October 2005

F. Darrouzet, 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 and numerical simulations
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, et F. Darrouzet
Electrostatic and electromagnetic emissions near the plasmasphere. A case event: 27 May 2003
J. L. Rauch, X. Suraud, P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, R. Ledée, F. El-Lemdani Mazouz, S. Grimald, G. Bozan, X Vallières, P. Canu, et F. Darrouzet
Automatic determination of the plasma frequency using image processing on WHISPER data
J. G. Trotignon, P. M. E. Décréau, J. L. Rauch, X. Suraud, G. Bozan, S. Grimald, F. El-Lemdani Mazouz, X. Vallières, P. Canu, F. Darrouzet, et A. Masson
The Electron Density Around the Earth, a High Level Product of the CLUSTER/WHISPER Relaxation Sounder
10th Cluster Workshop (Cluster and Double Star symposium, 5th anniversary of Cluster in Space), Noordwijk, The Netherlands, 19−23 September 2005

F. Darrouzet, J. De Keyser, P. M. E. Décréau, D. Gallagher, V. Pierrard, J. Lemaire, I. Dandouras, H. Matsui, M. Dunlop, et M. André
Analysis of plasmaspheric plumes: CLUSTER and IMAGE observations and numerical simulations
H. Lamy, M. Echim, F. Darrouzet, J. Lemaire, P. Décréau, et M. Dunlop
Magnetopause turbulence studied with CLUSTER data : evidence of intermittency
Congrès Général de la Société Française de Physique (SFP) et de la Société Belge de Physique (BPS), Lille, France, 29 August−02 September 2005

M. M. Echim, H. Lamy, F. Darrouzet, J. Lemaire, P. Décréau, et M. Dunlop
Investigation of the intermittent turbulence in the outer cusp with CLUSTER data
IAGA, 10th Scientific Assembly, Toulouse, France, 18−29 July 2005

S. Grimald, P. M. E. Décréau, G. Le Rouzic, J. L. Rauch, X. Suraud, J. G. Trotignon, X. Vallières, P. Canu, et F. Darrouzet
Four-point observations of NTC in the vicinity of sources: two related cases events
EGU, 2nd General Assembly, Vienne, Austria, 24−29 April 2005

J. Cabrera, F. Darrouzet, B. R. Sandel, D .L. Gallagher, L. Jacques, J. P. Antoine, et J. F. Lemaire
Wavelet Analysis of EUV Plasmasphere Maps
30^{th} Yosemite Workshop, Yosemite National Park, USA, 03−06 February 2004

J. De Keyser, F. Darrouzet, et M. Roth
Single- and multi-spacecraft techniques for resolving the 1D and 2D structure of the magnetospheric boundary
F. Darrouzet, W. N. Spjeldvik, J. F. Lemaire, G. Gustafsson, et P. M. E. Décréau
The SEVEM project: Towards statistical and empirical models of the distribution of VLF waves
IUGG, XXIIIrd General Assembly, Sapporo, Japan, 30 June−11 July 2003

F. Darrouzet, W. N. Spjeldvik, J. F. Lemaire, et G. Gustafsson
Towards statistical and empirical models of the distribution of VLF power spectral densities at high latitude from the observations of the Swedish Viking spacecraft
P. M. E. Décréau, E. Le Guirriec, J. L. Rauch, J. G. Trotignon, P. Canu, F. Darrouzet, J. Lemaire, et A. Masson
Properties of density structures measured by the Whisper instrument on-board the Cluster constellation
COSPAR, 34^{th} Scientific Assembly, Houston, USA, 10−19 October 2002

F. Darrouzet, J. Lemaire, P. M. E. Décréau, J. G. Trotignon, J. L. Rauch, E. Le Guirriec, O. Randriamboarison, P. Canu, O. Moullard, A. Masson, et F. Sedgemore
Multipoint observation of small scale irregularities at the plasmapause using the Whisper measurements
URSI, XXVIIth General Assembly, Maastricht, The Netherlands, 17−24 August 2002

P. M. E. Décréau, E. Le Guirriec, J. L. Rauch, J. G. Trotignon, F. Darrouzet, J. Soucek, P. Canu, M. Dunlop, A. Balogh, et F. Sedgemore
Electron density structures measured by the Whisper/Cluster instrument: case studies at magnetopause traversals and in the magnetosphere
EGS, XXVIIth General Assembly, Nice, France, 21−26 April 2002

P. M. E. Décréau, J. L. Rauch, J. G. Trotignon, E. Le Guirriec, V. Krasnosels'kikh, P. Canu, F. Darrouzet, J. Lemaire, et C. C. Harvey
Results from the Whisper instrument on its first year in orbit (Invited Poster)
J. G. Trotignon, P. M. E. Décréau, J. L. Rauch, E. Le Guirriec, P. Canu, et F. Darrouzet
Ability of the CLUSTER/WHISPER relaxation sounder to achieve thermal plasma diagnosis
AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 10−14 December 2001

Etude de la magnétosphère terrestre par l'analyse multipoint des données de la mission CLUSTER. Contributions à la caractérisation des frontières et de la magnétosphère interne

CLUSTER est la première mission spatiale permettant l'étude à trois dimensions de la magnétosphère terrestre. Son orbite polaire et sa configuration de quatre satellites en tétraèdre lui permettent d'effectuer des mesures in situ dans plusieurs régions de la magnétosphère, notamment dans la plasmasphère. Cette thèse rassemble une série de travaux sur les structures de plasma rencontrées sur l'orbite de CLUSTER durant la période 2001-2004. La quantité physique étudiée est essentiellement la densité électronique, mais aussi le champ magnétique continu. Dans une première partie, deux outils d'analyse multipoints, le gradient spatial et la méthode des délais, sont décrits, testés et discutés sur des jeux de données synthétiques, puis sur des données réelles, pour diverses situations typiques. Dans le cadre de conditions favorables, ces analyses révèlent le mouvement, l'orientation de frontières, ainsi que les dimensions des structures rencontrées, impossibles à estimer par une mission composée d'un seul satellite. Une seconde partie s'intéresse plus globalement à la plasmasphère, notamment à la topologie et à la dynamique de ses structures de densité à petite et grande échelle. Cette étude s'appuie sur les analyses multipoints vues précédemment, mais elle utilise également des données d'autres instruments de CLUSTER, des images globales de la plasmasphère fournies par la mission IMAGE, ainsi que des résultats d'études statistiques et de simulations numériques. Enfin, la thèse décrit une analyse statistique menée sur un autre jeu de données: les densités de puissance spectrales des ondes électromagnétiques mesurées à basse altitude par le satellite Viking durant l'année 1986.

Mots-clés: Magnétosphère Terrestre,Multipoint,Gradient Spatial,CLUSTER,Plasmasphère

Study of the terrestrial magnetosphere by multipoint data analysis with the CLUSTER mission. Contributions to the characterization of boundary layers and of the inner magnetosphere

CLUSTER is the first space mission dedicated to the three-dimensional study of the terrestrial magnetosphere. Its polar orbit and four spacecraft tetrahedron formation allow it to make in situ measurements in various regions of the magnetosphere, in particular in the plasmasphere. This PhD thesis brings together several studies on plasma structures encountered by the CLUSTER spacecraft along their orbit, during the time period 2001-2004. The physical quantity analysed here is mainly the electronic density, but also the DC magnetic field. In a first part of the thesis, two multipoint analysis tools, the spatial gradient and the time delay, are described, tested - using synthetic datasets then real data - and discussed for typical situations. When conditions are favourable, these analyses reveal the boundary motion and orientation, as well as the dimensions of the structures encountered, impossible to estimate with a single satellite mission. Another part of the thesis deals more globally with the plasmasphere, focusing particularly on the topology and dynamics of small- and large-scale density structures. This study is based on the multipoint analyses previously introduced. It also presents and discusses datasets from other CLUSTER instruments, global images of the plasmasphere from the IMAGE mission, and results from statistical studies and numerical simulations. Finally, the thesis describes a statistical study based on another dataset: the power spectral densities of electromagnetic waves measured at low altitude by the Viking spacecraft in 1986.

Keywords: Terrestrial Magnetosphere,Multipoint,Spatial Gradient,CLUSTER,Plasmasphere

Discipline: Physique

Laboratoire: IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique)
3, avenue Circulaire, 1180 Bruxelles, Belgique