



HAL
open science

Etude expérimentale de l'ionosphère de moyenne et basse latitude et de ses instabilités au moyen d'observations in-situ par DEMETER

Chien-Thang Nguyen

► **To cite this version:**

Chien-Thang Nguyen. Etude expérimentale de l'ionosphère de moyenne et basse latitude et de ses instabilités au moyen d'observations in-situ par DEMETER. Océan, Atmosphère. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2015. Français. NNT : 2015VERS044V . tel-01412400

HAL Id: tel-01412400

<https://theses.hal.science/tel-01412400>

Submitted on 8 Dec 2016

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

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

UNIVERSITE DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE VERSAILLES – STV 539

**Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations
Spatiales, LATMOS UMR 8190**

THESE DE DOCTORAT

DE L'UNIVERSITE DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES

DISCIPLINE / SPECIALITE: PHYSIQUE / Milieux Dilués et Optique

Présentée par :

Chiến-Thắng NGUYỄN

Pour obtenir le grade de **Docteur de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines**

**ETUDE EXPÉRIMENTALE DE L'IONOSPHERE DE
MOYENNE ET BASSE LATITUDE ET DE SES
INSTABILITÉS AU MOYEN D'OBSERVATIONS IN-SITU
PAR DEMETER**

Soutenue le 25 Septembre 2015

JURY :

Mme Valérie CIARLETTI, PR, UVSQ (Présidente)

M. Michel BLANC, Astronome, IRAP (Rapporteur)

M. Jean LILENSTEN, DR CNRS, IPAG (Rapporteur)

M. Jean-Pierre LEBRETON, Chercheur associé, LPC2E (Examineur)

M. Minh LE HUY, DR, Institut de Géophysique, Hanoi, Vietnam (Examineur)

M. Michel PARROT, DR CNRS, LPC2E (Examineur)

M. Jean-Jacques BERTHELIER, DR émérite CNRS, LATMOS (Directeur de Thèse)

Mme Christine AMORY, Chercheur, Paris Sorbonne UPMC, LPP (Co-Directrice de Thèse)

Remerciements

Mes premiers remerciements vont d'abord à mes deux directeurs de thèse Christine Amory Mazaudier et Jean-Jacques Berthelier pour avoir dirigé mon travail et m'avoir aidé à aller jusqu'au bout.

Je remercie chaleureusement Christine Amory Mazaudier, ma co-directrice de thèse, pour avoir su me transmettre sa passion de la recherche et pour m'avoir permis de réaliser ma thèse grâce à l'étendue de ses connaissances en physique. Je n'aurais pas pu rêver avoir de meilleure co-directrice, toujours disponible, motivée, et toujours de bons conseils.

J'exprime ma profonde gratitude à Jean-Jacques Berthelier, mon directeur de thèse, qui m'a aidé, accompagné et donné de bons conseils de par sa connaissance profonde et de son aptitude scientifique pendant ces quatre ans de thèse. Ses connaissances et expertises scientifiques en théorie mais aussi en pratique, sa gentillesse m'ont permis de bien réaliser cette étude complexe abordant plusieurs domaines de la physique. Son enthousiasme, son attitude sérieuse, sa motivation au travail et son dévouement par lesquels j'ai appris m'ont encouragé à surpasser les difficultés que l'on connaît en recherche. Je le remercie de m'avoir permis de rentrer au Vietnam chaque année pour revoir ma famille et mes proches.

Il ne m'est pas facile d'exprimer la reconnaissance que j'éprouve envers LE Huy Minh. Ce dernier m'a accueilli au Département de Géomagnétisme à l'Institut de Géophysique de Hanoï en 2004. Il m'a donné d'abord des connaissances indispensables pour aborder la physique de l'ionosphère et il a par ailleurs dirigé mon mémoire de maîtrise à l'Université Nationale de Hanoï. Je le remercie également d'avoir accepté de parcourir tant de distance pour faire parti du jury lors de la soutenance de cette thèse.

Mes sincères remerciements sont adressés à Monique Petitdidier pour son enthousiasme, son aide désintéressée, ses conseils et pour sa disponibilité en tant que ma deuxième co-directrice. Je tiens à remercier également son mari. Je n'oublierai jamais les repas intimes et chaleureux où je fus convié cela à l'occasion de fêtes importantes avec leurs amis, ou quand j'étais le seul invité.

Ce travail a été réalisé au laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, LATMOS. Je remercie Mme Danièle Hauser et M. Philippe Keckhut, précédent et actuel

directeurs du LATMOS de m'avoir permis de travailler au sein de leur laboratoire dans d'excellentes conditions. Je tiens à remercier Michel Cabane, François Leblanc et Dimitra Koutroumpa pour leur sympathie et leurs précieuses aides lors des premiers jours pendant lesquels je travaillais à Jussieu.

Je remercie les membres du Jury d'avoir accepté d'examiner ma thèse et plus particulièrement les rapporteurs, M. Michel Blanc et M. Jean Lilensten dont les remarques et les suggestions m'ont permis d'améliorer considérablement le texte du manuscrit.

Je remercie mes collègues de l'Institut de Géophysique de Hanoï pour leurs soutiens, aides et conseils. Je remercie également le gouvernement vietnamien qui a financé cette thèse pendant quatre années.

Je tiens à remercier le CROUS de Créteil et CAMPUS France qui ont géré mon dossier et m'ont permis de me loger durant quatre années.

Je remercie Tatsuo Onishi pour son aide pour les premières lignes et les premiers programmes de code IDL, ainsi que de m'avoir fourni des données DEMETER.

J'aimerais spécialement adresser mes remerciements à Véronique Durel, Agnès Brault et tous les membres des Équipes d'Accueil et d'Amitié pour les Étudiants Étrangers pour leur sympathie et leur aide à améliorer ma langue française.

Un grand merci chaleureux à mes amis vietnamiens en France pour leur amitié, aide et soutien durant ces quatre années.

Enfin, mes chaleureuses pensées à ma famille, en particulier mes parents qui m'ont accompagné par leur soutien et leur affection tout au long de ce travail.

J'exprime du fond du cœur ma reconnaissance envers ma femme et mes enfants pour leur courage à surmonter les nombreuses difficultés pendant les années où j'étais absent et d'avoir supporté tout mon long séjour en France.

Résumé

L'objectif de la thèse était d'analyser les perturbations que l'on observe de façon régulière dans l'ionosphère supérieure de nuit à moyenne et basse latitude en utilisant les données fournies par le satellite DEMETER. Dans un premier temps une analyse morphologique des profils en latitude de la densité électronique et de la densité des ions majoritaires O^+ a été utilisée pour reconnaître un certain nombre de perturbations caractéristiques de moyenne échelle, c'est à dire avec une extension moyenne de l'ordre de 100 à 1000 km le long de l'orbite du satellite, en retenant les événements qui se produisent de façon courante et ne résultent donc pas d'événements exceptionnels comme les éjections de masse coronale (CME) ou les orages magnétiques. Deux types de perturbations présentent un intérêt particulier par leur fréquence d'occurrence et par l'amplitude des variations du plasma et c'est sur ces phénomènes que nous avons centré notre étude.

Le premier correspond à des oscillations de la densité du plasma, très visibles sur les mesures des ions O^+ , avec des périodes de quelques dizaines à quelques centaines de secondes dans le repère du satellite. Observées entre 15° et 40° de latitude avec une probabilité généralement plus forte dans l'hémisphère Sud, elles sont caractérisées par une distribution dissymétrique en longitude avec un maximum très net dans les secteurs des océans Indien et Pacifique. Ces phénomènes s'apparentent aux perturbations ionosphériques itinérantes et doivent donc être engendrées par des ondes de gravité qui se propagent dans la haute atmosphère où elles se couplent avec le plasma ionosphérique. La faible influence de l'activité magnétique sur ces événements semble exclure une source de type auroral et indiquer que l'origine des ondes de gravité se situe préférentiellement dans l'atmosphère météorologique. Une caractéristique très intéressante est l'impact significatif de ces perturbations sur l'électrodynamique de l'ionosphère.

Le second type de phénomènes concerne l'ionosphère équatoriale et se caractérise par une augmentation de la densité électronique sous la forme d'un plateau d'une extension de l'ordre de 15° en latitude autour de l'équateur magnétique. Une analyse morphologique détaillée a mis en évidence des formes distinctes pour ces perturbations, résultat qu'on peut interpréter comme témoignant de la dynamique de l'ionosphère associée à la variation du niveau d'activité magnétique. Dans les séquences finales, cette évolution se traduit par le

déclenchement des instabilités bien connues de l'ionosphère nocturne à l'équateur et la formation des bulles de plasma.

Grace à la longue série d'observations effectuées par le satellite DEMETER, en particulier pendant la période du minimum très prononcé d'activité solaire de 2008-2009, nos résultats fournissent un apport nouveau à la climatologie des perturbations de l'ionosphère de moyenne et basse latitude et, de façon plus générale, à la météorologie de l'espace.

Mots-clés : Ionosphère, Ondes de gravité, Champ électrique

Abstract

This thesis aims at analyzing the disturbances that are regularly observed in the nighttime upper ionosphere at middle and low latitudes by using the DEMETER data base. In a first step, a morphological analysis of the electron and O⁺ ion densities was performed to determine middle scale (~500 to ~ 1000km) and large scale (~ 1500 to ~ 3000 km) disturbances that are regularly observed on their orbit profiles and do not occur in response to exceptional events such as CME and magnetic storms. Two main types of disturbances were thus identified referred to in the following as C and D events.

C-events appear as quasi periodic, large amplitude variations of the electron and O⁺ ion densities, very clearly visible, in particular, on the O⁺ ion density profiles. Predominantly observed at geomagnetic latitudes between 15° and 40° with a larger occurrence in the Southern hemisphere they display a longitudinal distribution showing a clear maximum over the Indian and Pacific oceans. We have identified these events as Mid-Scale Traveling Ionospheric disturbances (MSTID) that arise from the interaction between atmospheric gravity waves (AGW) and the ionospheric plasma. The observed lack of influence of magnetic activity on their occurrence, seems to preclude an auroral source and to favor an atmospheric source. One of the most interesting characteristics of these events is their significant impact on the ionospheric electrodynamics.

D-type events are large scale phenomena characterized by plateaus of increased plasma density extending about ~ 15° in latitude and centered on the magnetic equator. A detailed morphological analysis have shown that these events may show various orbit profiles, in particular including mid-scale density troughs within the large scale plateau itself. These features seem to arise from ionospheric conditions linked with the level of magnetic activity, ultimately leading to the triggering of instabilities in the equatorial ionosphere and to the formation of the well-known equatorial plasma bubbles.

Thanks to the long series of observations made by DEMETER during its operational phase, on either side of the deep solar minimum of 2008-2009, our work brings new results on the climatology of ionospheric disturbances at middle and low latitudes and, more generally, to space weather.

Keywords : Ionosphere, Gravity wave, Electric field

Table des matières

1- INTRODUCTION.....	1
2- LE SATELLITE DEMETER ET LES EXPERIENCES DE MESURE DU PLASMA ET DES CHAMPS ELECTRIQUES.....	5
2.1- La mission DEMETER	5
2.2- Le microsatellite DEMETER	6
2.2.1- Caractéristiques principales et charge utile scientifique	7
2.2.2- Orbite	8
2.2.3- Modes de fonctionnement	8
2.2.4- Repères	9
2.3- Expérience ISL	11
2.4- Expérience IAP	12
2.4.1- Introduction	12
2.4.2- Description de l'instrument	13
2.4.2.1- Analyseur APR	13
2.4.2.2- Analyseur ADV	16
2.4.3- Modes de fonctionnement	19
2.5- Expérience ICE	20
2.5.1- Description de l'expérience	20
2.5.1.1- Senseurs	21
2.5.1.2- Traitement des signaux à bord de DEMETER et données transmises au sol	22
2.5.2- Principe de mesure des sondes dipolaires et conséquences expérimentales	23
3- GENERALITES SUR: L'ACTIVITÉ SOLAIRE, L'ACTIVITE MAGNÉTIQUE ET LA PHYSIQUE DE L'IONOSPHERE AUX BASSES LATITUDES.....	29
3.1- L'activité solaire et ses variations pendant la période opérationnelle de DEMETER .	29
3.1.1- Les taches solaires, le cycle de 11 ans et le champ magnétique du Soleil	29

3.1.2- Rayonnement solaire et vent solaire.....	33
3.1.3- Les grandes perturbations solaires.....	34
3.2- L'activité magnétique et ses variations pendant la période opérationnelle de DEMETER	36
3.2.1- Généralités sur le champ magnétique terrestre.....	36
3.2.2- Les Indices Magnétiques	37
3.3- Atmosphère et ionosphère.....	42
3.3.1- L'atmosphère.....	42
3.3.2- L'ionosphère.....	44
3.4- Modèle simplifié de l'ionosphère: le modèle de Chapman.....	46
3.5- La structure de l'ionosphère.....	47
3.6- Équations de continuité	49
3.7- Équations de mouvement	49
3.7.1- Dans la direction perpendiculaire	50
3.7.2- Dans la direction parallèle	51
3.8- Equations d'énergie.....	52
3.8.1- Equation de conservation de l'énergie pour les ions	52
3.8.2- Equation de conservation de l'énergie pour les électrons	52
3.9- Spécificités de l'ionosphère de basse latitude	53
3.9.1- La fontaine équatoriale	53
3.9.2- L'électrojet équatorial	54
3.9.3- Le 'Pre Reversal Enhancement' (PRE)	55
4- PERTURBATIONS OBSERVEES SUR LES ORBITES DE NUIT DE DEMETER – CARACTERISTIQUES ET CLASSIFICATION.....	57
4.1- Activité solaire et magnétique de 2005 à 2010	57
4.2- Perturbations caractéristiques sur les orbites de nuit	58
4.2.1- Type A	60

4.2.2- Type B	61
4.2.3- Type C	62
4.2.4- Type D	62
4.2.5- Type E	65
5- PERTURBATIONS QUASI-PERIODIQUES A MOYENNE ECHELLE DANS L'IONOSPHERE DE MOYENNE LATITUDE	67
5.1- Description des évènements, caractéristiques principales et traitement des données ..	67
5.1.1- Détection et morphologie des évènements	67
5.1.2- Traitement des données : standardisation de l'échantillonnage	71
5.1.3- Détermination précise des temps de début et fin des évènements.....	71
5.2- Seuil de sensibilité de l'analyseur IAP sur la détection des évènements	74
5.2.1- Occurrence des évènements et densité moyenne N(O+).....	75
5.2.2 – Recherche d'un éventuel biais induit par le seuil de mesure de IAP.....	76
5.3 – Analyse spectrale des perturbations de la densité N(O+).....	78
5.3.1- Calcul des spectres et problèmes induits par la morphologie du signal	78
5.3.2- Détermination des fréquences caractéristiques	80
5.3.3- Analyse statistique des fréquences fondamentales des perturbations	83
5.4 – Régions et fréquences d'occurrence	84
5.5 – Variations saisonnières, inter-annuelles et influence de l'activité solaire.....	88
5.5.1- Variations saisonnières	88
5.5.2- Variations interannuelles	90
5.5.3- Influence de l'activité solaire	90
5.6- Influence de l'activité magnétique	92
5.7- Mesures de Champ Electrique et influence des perturbations de l'ionosphère supérieure sur l'électrodynamique de l'ionosphère.....	95
5.8- Interprétation et discussion des résultats.....	99
5.8.1- Résumé des résultats.....	99
5.8.2- Résultats obtenus dans ce domaine	100

5.8.3 Interprétation.....	101
6- EVENEMENTS D ET E ET DYNAMIQUE DE L'IONOSPHERE DE BASSE	
LATITUDE.....	105
6.1- Description et détection des évènements	105
6.1.1- Type D1	106
6.1.2- Type D2.....	106
6.1.3- Type D3.....	108
6.1.4- Type D4.....	108
6.1.5- Type E	109
6.2- Caractérisation détaillée des évènements et traitement des données.	111
6.2.1- Standardisation de l'échantillonnage des données	111
6.2.2- Traitement des évènements D1 et D2.....	111
6.2.3- Traitement des évènements D3	112
6.2.3- Traitement des évènements D4	114
6.3- Régions d'occurrence des évènements.....	115
6.3.1- Evènements D1 et D2.....	115
6.3.2- Evènements D3.....	118
6.3.3- Evènements D4.....	119
6.3.4- Evènements E, bulles de plasma équatoriales	120
6.4- Variations saisonnières et inter-annuelles	121
6.4.1- Evènements D3.....	121
6.4.2- Evènements D4.....	123
6.4.3- Evènements de type E	124
6.5- Influence de l'activité solaire et de l'activité magnétique.....	125
6.6- Discussion et interprétation des observations	130
CONCLUSION.....	137
BIBLIOPRAPHIE.....	141

Table des figures

<i>Figure 2.1. Vue éclatée de la structure du satellite DEMETER et de ses appendices.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2.2. Vue d'artiste du satellite en configuration orbitale</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2.3. Variations de la trace de quelques orbites successives, jour en vert, nuit en bleu .</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2.4. Axes X_s, Y_s, Z_s constituant le repère du satellite et position des électrodes de l'expérience ICE.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2.5. Repère géocentrique local.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 2.6. Repère géomagnétique local</i>	<i>10</i>
<i>Figure 2.7. Schéma de principe de l'analyseur APR.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2.8. Effet du potentiel satellite sur la vitesse des ions à l'entrée des analyseurs.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2.9. (a) Schéma de principe de l'analyseur ADV, (b) Schéma montrant la structure en 4 quadrants du collecteur de ADV.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 2.10. Composantes des vitesses ioniques à l'entrée des analyseurs</i>	<i>18</i>
<i>Figure 2.11. Disposition des senseurs de l'expérience ICE</i>	<i>21</i>
<i>Figure 2.12. (a) Principe physique de la mesure des champs électriques par sonde dipolaire, (b) Schéma électronique du fonctionnement d'une sonde dipolaire.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 3.1. Photo de taches solaires [satellite SOHO] et structure interne du Soleil.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 3.2. Cycle des taches solaires: diagramme papillon (site de la Nasa); sur l'axe des ordonnées il y a la latitude, sur l'axe des abscisses les années</i>	<i>30</i>
<i>Figure 3.3. Variation de F10.7 (station de Penticon/USA) et de SSN (observatoire de Bruxelles) de 1947 à 2012. Figure tirée du site de l'observatoire de Meudon.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 3.4. Cycle solaire complet (Li et al, 2011) en couleur la figure combine les champs toroïdal et poloïdal; B(G): Champ magnétique dipolaire ou champ poloïdal exprimé en Gauss en fonction du temps exprimé en année; SSN ou champ toroïdal.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 3.5. Spectre des émissions électromagnétiques du Soleil.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 3.6. Eruption de classe X1.0, Oct. 27, 2013 (image of NASA's Solar Dynamics Observatory, Credit: NASA/SDO)</i>	<i>34</i>
<i>Figure 3.7. Photo montage de l'éjection de masse coronale observée par les instruments de SOHO (Crédits : ESA/NASA).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 3.8. Trou coronal observé par le satellite SOHO.....</i>	<i>35</i>

<i>Figure 3.9. Jet de vent rapide émis depuis un trou coronal (Legrand, 1984)</i>	<i>35</i>
<i>Figure 3.10. Le champ magnétique de la terre, d'après Gilbert (1600), conception du 17eme siècle.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 3.11. Le champ magnétique terrestre</i>	<i>36</i>
<i>Figure 3.12. Variations de la composante horizontale H observée à l'observatoire de Guam</i>	<i>37</i>
<i>Figure 3.13. Distribution des observatoires magnétiques sélectionnés.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 3.14. Extrait de table des indices Am et Kpm.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 3.15. Valeurs des indices Am/Kpm pour l'orage du 5 Avril 2010.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 3.16. Exemple des variations de la vitesse du vent solaire (Vx), du champ magnétique interplanétaire (Bz) et des indices Dst, AU et AL lors d'un orage magnétique pendant la période du 3 au 10 Avril 2010.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 3.17. Variation des indices Aa de 1868 à 2010.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 3.18. Profil de la température de l'atmosphère avec la définition.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3.19. Profils de la densité électronique de l'ionosphère-de jour- et de la température de l'atmosphère.</i>	<i>44</i>
<i>Figure 3.20. Concentration des différents ions, atomes et molécules dans l'ionosphère en fonction de l'altitude (d'après Rishbeth and Garriott, 1969).....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 3.21. Modèle Chapman de la formation de l'ionosphère (Chapman et Ferraro 1931).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 3.22. Les couches de l'ionosphère de jour et de nuit. (Bauer, 1973).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 3.23. Fréquences de collision et gyrofréquences (Richmond, 1995)</i>	<i>50</i>
<i>Figure 3.24. La fontaine équatoriale.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3.25. L'électrojet équatorial EEJ (Jacobs, 1990)</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3.26. Vitesses verticales moyennes du plasma à Jicamarca pendant l'équinoxe (Mars-Avril, Septembre- Octobre), hiver (Mai-Août), été (Novembre- Février) pour 3 valeurs de flux solaire (Fejer et al., 1991)</i>	<i>55</i>
<i>Figure 3.27. Schéma séquentiel, à partir de photos, du développement d'une instabilité de Rayleigh Taylor. Fluide le plus lourd, au-dessus d'un fluide plus léger et transparent (Kelley, 2009).....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 4.1.(a),(b) Montrant les anomalies parasites sur Ti dans les encadrements</i>	<i>60</i>
<i>Figure 4.2. Type A.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 4.3. Type B1.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 4.4. Type B2.....</i>	<i>62</i>

Figure 4.5. Type C.....	62
Figure 4.6. Type D1	63
Figure 4.7. Type D2	64
Figure 4.8. Type D3	64
Figure 4.9. Type D4	64
Figure 4.10. Type E, bulles de plasma.....	65
Figure 5.1.a. Evènement observé dans l'hémisphère Sud d'une durée totale de ~ 8 minutes avec des oscillations de très grande amplitude sur $N(O^+)$ atteignant $\sim 6.10^4$ ions/cm ³ pour une densité moyenne de l'ordre de $\sim 5.10^4$ ions/cm ³ . L'augmentation brutale de T_i dans l'hémisphère Nord résulte d'un défaut du logiciel de traitement (voir Chapitre 4).	69
Figure 5.2. (a) profil de $N(O^+)$ le long de l'orbite, durée de l'évènement reconnue visuellement en bleu, intervalles de temps ajoutés avant et après l'évènement en rouge, ajustement $P(t)$ en vert, (b) écart-type σ calculé sur des intervalles de 16 points, glissant de 4 points et détermination de T_1 et T_2 , (c) $\delta = [N(O^+)_{mesuré}-P(t)]/P(t)$, perturbation normalisée.	73
Figure 5.3. Intervalles de latitude utilisés pour l'étude de l'effet de l'ionosphère et du seuil de sensibilité de l'analyseur IAP.	74
Figure 5.4.a. Variations en longitude des densités moyennes $N(O^+)$, janvier 2009.....	75
Figure 5.5.a. Orbites avec évènement C : pour chaque hémisphère et chaque classe d'activité, moyennes statistiques R_m (panneau supérieur) et nombre d'orbites N' où $N(O^+)$ est inférieur à 30 ions/cm ³ au moins 1 fois (panneau inférieur).....	77
Figure 5.6.a- Panneau (a), profil de la densité NO^+ , la durée effective de l'évènement entre T_1 et T_2 est indiquée en bleu sur le tracé, Panneau (b), profil des perturbations normalisées, Panneau (c), spectre.	79
Figure 5.7.a. Orbite 28992.1, détermination précise des caractéristiques des pics du spectre.	82
Figure 5.8. Histogrammes des fréquences fondamentales des spectres des perturbations.....	83
Figure 5.9.a-f. Traces de l'orbite pendant les intervalles de temps où un évènement est détecté pour 6 ans d'observations de DEMETER (2005-2010). En bleu la trace de l'équateur magnétique	85
Figure 5.10. Cartes annuelles des probabilités d'occurrence des évènements de type C	86

<i>Figure 5.11. Zones d'occurrence des différentes classes d'évènements.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 5.12. Variations saisonnières de la probabilité d'occurrence des évènements de type C</i>	<i>89</i>
<i>Figure 5.13. Distributions annuelles de la probabilité d'occurrence en fonction de l'activité magnétique</i>	<i>94</i>
<i>Figure 5.14. Variation de l'occurrence et de l'amplitude des évènements avec l'activité magnétique à la suite d'un CME et d'un orage magnétique.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure 5.15. Orbite 28993.1, perturbations de type C sur $N(O^+)$ et sur les composantes du champ électrique dans le repère du satellite.....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 5.16. Détermination des lignes de base des composantes du champ électrique.</i>	<i>97</i>
<i>Figure 5.17. Variations simultanées de $N(O^+)$ et des composantes du champ électrique dans le plan perpendiculaire au champ magnétique terrestre.</i>	<i>98</i>
<i>Figure 5.18. Direction de polarisation des oscillations du champ électrique dans le plan perpendiculaire à B.....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 5.19.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 6.1. Événement de Type D1</i>	<i>106</i>
<i>Figure 6.2. Événement de Type D2</i>	<i>107</i>
<i>Figure 6.3. Événement de Type D3.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 6.4. Événement de Type D4.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 6.5. Évènements de type E, bulles de plasma équatoriales.</i>	<i>110</i>
<i>Figure 6.6. Détermination des temps début (T_1) et fin (T_2) d'un évènement de Type D1</i>	<i>112</i>
<i>Figure 6.7.a. Détermination des temps caractéristiques d'un évènement de type D32 sans minimum relatif de la densité électronique N_e dans le plateau.</i>	<i>113</i>
<i>Figure 6.8.a. Détermination des temps caractéristiques d'un évènement de type D4 avec indication par une marque bleu des positions des minima des « trous » de densité à moyenne échelle et par une marque rouge des temps début et fin de ces structures. Comme dans de nombreux cas la seconde structure débute immédiatement à la fin de la première, les temps T_b de la première et T_a de la seconde étant alors confondus.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure 6.9.a. Distribution géographique des évènements D1. Les segments de grande longueur sont des artefacts du traitement et ne sont pas à considérer.</i>	<i>116</i>
<i>Figure 6.10. Distribution géographique des évènements D2. Les tracés relient le premier évènement au second, chaque évènement ayant une durée faible semblable à celles des évènements D1 de la Figure 6.8a.....</i>	<i>118</i>

<i>Figure 6.11. Traces des segments d'orbites pendant lesquels un évènement de type D3 est observé (années 2005 à 2010). La position du plateau, entre Tmax1 et Tmax2, est indiqué en bleu, les flancs des perturbations, entre T1 et Tmax1 et Tmax2 et T2, sont indiqués en rouge.</i>	<i>119</i>
<i>Figure 6.12. Traces des segments d'orbites pendant lesquels un évènement de type D4 est observé (années 2005 à 2010). La position du plateau, entre Tmax1 et Tmax2, est indiqué en bleu, les flancs des perturbations, entre T1 et Tmax1 et Tmax2 et T2, sont indiqués en rouge.</i>	<i>120</i>
<i>Figure 6.13. Traces des segments d'orbites pendant lesquels un évènement de type E (bulles de plasma) est observé (années 2005 à 2010). Ces perturbations de moyenne échelle se produisent en général dans un plateau à grande échelle assez semblable aux évènements D3 et D4 et qui délimite les durées d'évènements et les tracés correspondants.</i>	<i>121</i>
<i>Figure 6.14.a. Variations saisonnières de la fréquence d'occurrence des évènements D3 ..</i>	<i>122</i>
<i>Figure 6.15. Variations saisonnières de Type D4 observés sur les probabilités d'occurrence d'évènement de 2005 à 2010.....</i>	<i>124</i>
<i>Figure 6.16. Variations saisonnières des évènements de type E.</i>	<i>124</i>
<i>Figure 6.17.a. Fréquence d'occurrence des évènements D3 en fonction de l'activité magnétique.</i>	<i>125</i>
<i>Figure 6.18. Modulation en longitude des évènements D3.....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 6.19. Variations en longitude de l'occurrence des évènements D4</i>	<i>132</i>
<i>Figure 6.20. Variations en longitude de l'occurrence des évènements E.....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 6. 21. Description temporelle des évènements détectés par DEMETER au cours de la deuxième quinzaine de Mars 2010.....</i>	<i>135</i>

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Ce travail a été entrepris pour recenser et analyser les perturbations que l'on observe de façon régulière dans l'ionosphère supérieure de nuit à moyenne et basse latitude. A partir des données fournies par le satellite DEMETER, l'analyse morphologique des profils en latitude de la densité électronique et de la densité des ions majoritaires O^+ nous a permis de distinguer un certain nombre de perturbations caractéristiques de moyenne échelle, c'est à dire avec une extension moyenne de l'ordre de 100 à 1000 km le long de l'orbite du satellite. Nous avons retenu les perturbations qui se produisent de façon courante et ne résultent donc pas d'évènements exceptionnels comme les éjections de masse coronale (CME) ou les orages magnétiques. Deux types de perturbations présentent un intérêt particulier par leur fréquence d'occurrence et par l'amplitude des variations du plasma et c'est sur ces phénomènes que nous avons centré notre étude. Le premier correspond à des oscillations de la densité du plasma, très visibles sur les mesures des ions O^+ , détectées à moyenne latitude et avec des périodes, dans le repère du satellite, de quelques dizaines à une centaine de secondes. Ces oscillations tirent leur origine de la présence d'ondes de gravité dans la haute atmosphère dont la source semble se situer dans l'atmosphère météorologique. La longue série d'observations de DEMETER nous a permis une analyse précise de la climatologie de ces évènements et, pour les plus importants, la mise en évidence d'un impact significatif sur l'électrodynamique de l'ionosphère. Le second type de phénomènes concerne l'ionosphère équatoriale. Les caractéristiques détaillées des perturbations de l'ionosphère supérieure obtenues par une analyse morphologique précise semblent montrer que ces perturbations s'inscrivent dans une évolution de l'ionosphère qui conduit, dans les séquences finales, au déclenchement des instabilités bien connues de l'ionosphère nocturne à l'équateur et à la formation des bulles de plasma.

Notre travail s'est donc inscrit dans l'une des thématiques scientifiques de la mission DEMETER, la physique de l'ionosphère et la météorologie spatiale. Bien que l'ionosphère ait fait l'objet d'un nombre considérable de travaux au cours des 40 dernières années fondés sur des mesures in-situ sur satellite ou s'appuyant sur des instruments puissants et perfectionnés au sol, la connaissance et la compréhension détaillée d'un certain nombre de phénomènes et

de mécanismes mis en jeu reste souvent insuffisante. Ceci explique le développement et l'intérêt de la météorologie spatiale dont le but, à l'instar de la météorologie traditionnelle, est de mettre au point des modèles susceptibles de fournir des informations quantitatives et des prévisions sur l'état de l'ionosphère et son évolution. Ces informations apparaissent désormais nécessaires en raison de l'étroite dépendance de l'activité humaine vis-à-vis des systèmes technologiques qui s'appuient sur une forte composante spatiale. Leur développement et leur complexité croissante les rendent, en effet, de plus en plus sensibles aux perturbations du milieu environnant, ionosphère ou magnétosphère. L'exemple le plus connu est évidemment celui des systèmes de positionnement tels le GPS et le futur Galileo européen dont on attend des performances accrues pour des applications toujours plus nombreuses et plus sophistiquées. Les régions de haute latitude sont, d'évidence, les régions où les perturbations de l'ionosphère sont les plus violentes mais l'ionosphère de moyenne et, surtout, de basse latitude ne peut pas être considérée comme un milieu uniforme et stable. En dehors même des périodes exceptionnelles qui suivent par exemple les événements solaires et les orages magnétiques, ce milieu est sujet à des variations temporelles et spatiales d'amplitudes notables. Ces phénomènes tirent leur origine soit du couplage avec la magnétosphère, essentiellement à travers les événements auroraux, soit du couplage avec l'atmosphère neutre sujette aux perturbations fortes que sont les ondes de gravité dont les sources sont multiples. La météorologie de l'espace a ainsi pour but de décrire et de comprendre l'ensemble des phénomènes qui jouent un rôle dans ces instabilités de l'ionosphère. Dans ce cadre, il est clair que la base de données fournie par DEMETER grâce à un fonctionnement quasi permanent aux latitudes inférieures à 65° et à la complémentarité des instruments de la charge utile pour l'observation du plasma et des ondes naturelles, apporte un moyen d'investigation unique.

La connaissance statistique précise et détaillée des perturbations « ordinaires » du plasma ionosphérique et la compréhension des mécanismes qui les engendrent est aussi indispensable pour permettre de détecter de façon fiable des anomalies qui pourraient être associées à l'activité sismique. L'objectif « météorologie de l'espace » rejoint donc l'objectif premier de la mission DEMETER qui était la recherche d'effets sur le plasma ionosphérique de l'activité pré-sismique. En dépit des très nombreuses publications recensées sur ce sujet au cours des 30 dernières années, aucun consensus ne se dégage actuellement dans ce domaine pour valider les observations et les relier à un modèle physique réaliste. L'une des raisons invoquées, certainement valable, est l'absence d'une connaissance statistique approfondie et précise des

perturbations ionosphériques qui peuvent être observées naturellement en l'absence d'activité sismique. Ceci rend tout à fait incertain, voire impossible, d'attribuer de façon sûre une observation particulière, voire même un ensemble d'observations, effectuées au voisinage des zones sismiques à un couplage englobant la lithosphère, l'atmosphère et l'ionosphère. On peut donc espérer que les résultats de notre travail seront aussi utiles pour amener des progrès dans la mise en évidence et la compréhension des mécanismes physiques qui régissent cette physique compliquée.

La suite du document est organisée en 5 chapitres.

Le chapitre 2 est consacré à une évocation rapide de la mission DEMETER et de ses objectifs et à la description de la charge utile scientifique et des instruments de mesure du plasma et des champs électriques qui ont été utilisés au cours de ce travail. Nous nous sommes efforcés de présenter de façon précise la physique de la mesure de ces instruments puisque le travail d'analyse des événements réclame une bonne compréhension de leur fonctionnement et de leurs limitations éventuelles.

Au chapitre 3 nous rappelons les éléments essentiels de la physique de l'ionosphère et les facteurs externes qui en contrôlent l'évolution et les perturbations, activité solaire et activité magnétique.

Le chapitre 4 est consacré à l'analyse morphologique des données de DEMETER, à la reconnaissance des perturbations les plus fréquentes et à la présentation des deux types d'événements étudiés dans la suite, les types C d'une part, D et E d'autre part.

Le Chapitre 5 est consacré à l'étude des événements de type C qui apparaissent comme les plus intéressants à la fois au niveau de la physique de l'ionosphère et parce qu'ils traduisent l'importance des couplages avec l'atmosphère neutre.

Le Chapitre 6 est consacré aux événements de type D et E présents au niveau de l'équateur et qui semblent traduire une évolution dynamique de l'ionosphère, les événements D préfigurant le stade final des événements E où l'ionosphère est instable.

Enfin, en conclusion dans le chapitre 7 nous faisons une synthèse des observations et de leurs interprétations, insistant sur l'apport original des données DEMETER et les idées que nous voudrions mentionner pour que ce travail puisse être poursuivi et valorisé, en particulier par un effort de modélisation.

CHAPITRE 2

LE SATELLITE DEMETER ET LES EXPERIENCES DE MESURE DU PLASMA ET DES CHAMPS ELECTRIQUES

2.1- La mission DEMETER

La mission DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) a été sélectionnée après une recommandation du Comité des Programmes Scientifiques du CNES. Ses objectifs scientifiques étaient la détection et la caractérisation des perturbations ionosphériques associées à des phénomènes naturels tels que les séismes, les tsunamis ou les éruptions volcaniques, ou aux effets de l'activité humaine comme les réseaux de distribution d'énergie électrique et les émetteurs radioélectriques. En raison de son intérêt évident pour les populations vivant dans les zones sismiques, l'accent a été mis sur la détection de perturbations qui pourraient être engendrées par l'activité pré-sismique. Il s'agissait de mettre en évidence par des mesures appropriées et des études d'évènements individuels ou statistiques un éventuel couplage entre les phénomènes préparatoires aux séismes dans la région de l'épicentre et l'environnement à haute altitude de la Terre. Au cours des 30 dernières années avant le lancement de DEMETER, cette thématique a donné lieu à de nombreuses publications relatives à des observations au sol ou dans l'espace ainsi qu'à des efforts théoriques et de modélisation sans que des conclusions claires se dégagent. L'une des raisons invoquées était le manque de dispositifs expérimentaux dédiés tels qu'un satellite avec une charge utile scientifique appropriée et un planning opérationnel permettant des observations les plus fréquentes possibles de l'ionosphère au voisinage des régions sismiques.

Pour répondre à ces besoins, une charge utile scientifique comportant un ensemble très complet d'instruments pour caractériser le plasma et les ondes électromagnétiques a été développée pour le satellite DEMETER. Simultanément, l'orbite et les opérations ont été optimisées pour maximiser le fonctionnement dans des conditions minimisant les variations naturelles de l'ionosphère d'une orbite à l'autre aux latitudes moyennes et basses où se situent la majorité des zones sismiques. En dehors des périodes d'activité sismique, cette charge utile devait fournir des observations complètes et permanentes de l'ionosphère et des ondes

naturelles dont l'interprétation et l'analyse statistique en fonction des saisons, de l'activité solaire et magnétique fournissait la « ligne de base » permettant de reconnaître d'éventuelles perturbations d'origine sismique qui ne peuvent être que de faible amplitude. Une des retombées très importantes de la mission concernait donc naturellement la physique de l'ionosphère et la météorologie de l'espace. Dans le passé, un certain nombre de missions destinées à l'étude des phénomènes auroraux ou de la magnétosphère lointaine (par exemple FAST aux USA, CLUSTER en Europe) ont fait appel à une charge utile scientifique semblable et souvent plus perfectionnée que celle de DEMETER. Cependant elles n'ont pas exploré les régions de basse et moyenne latitude. Grâce à plus de 6 ans de phase opérationnelle, la mission DEMETER a ainsi produit une base de données unique pour la « climatologie » de l'ionosphère de moyenne et basse latitude qui a permis de mettre en évidence et d'analyser des phénomènes nouveaux ou qui n'avaient pas pu être étudiés par manque d'observations suffisantes par le passé. C'est dans ce contexte de la météorologie de l'espace et de la physique de l'ionosphère que s'inscrit le présent travail.

2.2- Le microsatellite DEMETER

DEMETER est le premier microsatellite de la série Myriades développé par le CNES pour des missions scientifiques réalisées rapidement et pour des coûts faibles. Les *Figures 2.1* et *2.2* (Cussac *et al.*, 2006) montrent une vue éclatée du satellite permettant de comprendre sa structure et son organisation, en particulier les différents appendices (bras déployables et panneaux solaires). Une « vue d'artiste » du satellite montre sa configuration en orbite.

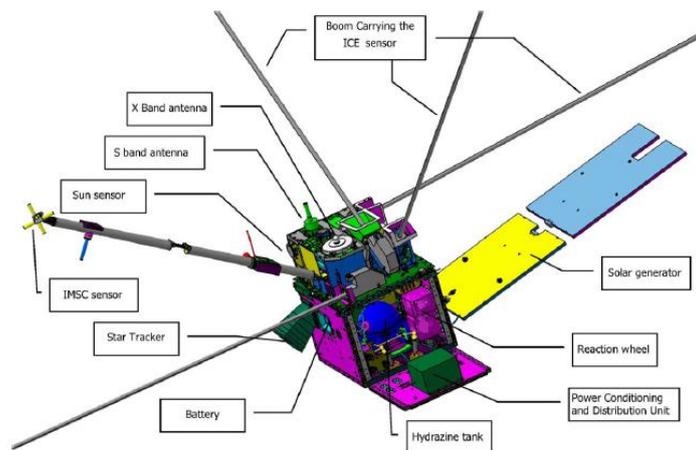


Figure 2.1. Vue éclatée de la structure du satellite DEMETER et de ses appendices



Figure 2.2. Vue d'artiste du satellite en configuration orbitale

2.2.1- Caractéristiques principales et charge utile scientifique

La charge utile scientifique de DEMETER est constituée de 5 instruments :

- ISL et IAP pour la mesure du plasma thermique de l'ionosphère,
- ICE et IMSC pour la mesure des champs électriques DC et AC et des champs magnétiques AC,
- IDP pour la mesure des électrons et protons de grande énergie.

La structure de base de DEMETER est un parallélépipède de dimensions 60x85x110 cm qui intègrent l'ensemble des sous-systèmes du satellite, télémesure et télécommande, deux instruments complets de la charge utile IAP et IDP et les modules électroniques des expériences ISL, ICE et IMSC qui permettent le traitement des signaux fournis par les senseurs de ces expériences montés sur des bras qui les éloignent du satellite et des panneaux solaires pour supprimer ou diminuer suffisamment les perturbations du plasma et des ondes induites par ces derniers. La masse du satellite au lancement était de 129 kg.

Une attention particulière a été portée à la propreté électromagnétique du satellite et des sous-systèmes dont dépend le bruit de fond des instruments ICE et IMSC, donc la qualité de leurs données, et qui affecte également la gaine qui entoure le satellite dans le plasma et les mesures de celui-ci par ISL et IAP. La plus grande partie du corps du satellite est ainsi revêtue d'une protection thermique dont la surface extérieure est conductrice et connectée au 0V électrique du satellite. De même, les cellules du panneau solaire qui constituent des sources notables d'interférences électromagnétiques ont été recouvertes d'un dépôt à base d'oxyde d'étain conducteur également au 0V électrique.

2.2.2- Orbite

DEMETER a été lancé le 29 Juin 2004 à 6.30 UTC par un lanceur DNEPR, missile intercontinental SS-18 déclassifié, sur une orbite circulaire à 715 km d'altitude avec une inclinaison de 98°. Cette orbite est quasi héliosynchrone avec un nœud ascendant (passage de l'équateur sur l'orbite ascendante de nuit de l'hémisphère sud vers l'hémisphère nord) à 22.30 LT. Au cours de l'année 2006, l'altitude du satellite a été ramenée à 650 km avec une période orbitale de 1.63 heures ce qui a induit une légère dérive de l'heure des nœuds ascendants et descendants qui sont cependant restés pendant toute la phase opérationnelle, jusqu'en Décembre 2010, dans les intervalles de temps local 21.30-22.30 sur la partie nuit des orbites et 9.30-10.30 sur la partie jour. La Figure 2.3 illustre le déplacement de la trace de l'orbite avec une variation de $\sim 25^\circ$ vers l'Ouest entre 2 orbites successives.

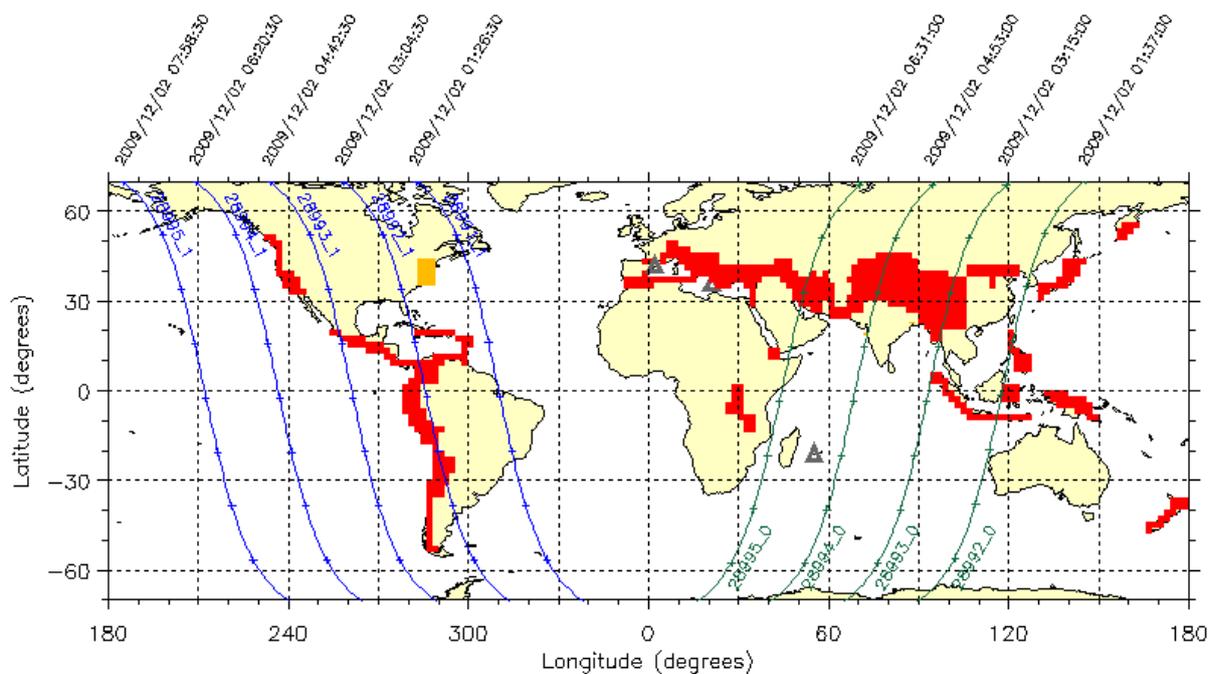


Figure 2.3. Variations de la trace de quelques orbites successives, jour en vert, nuit en bleu

Les zones sismiques sont indiquées en rouge

2.2.3- Modes de fonctionnement

DEMETER est stabilisé 3 axes avec l'axe OX dirigé vers le nadir, l'axe OZ dirigé à l'opposé de la vitesse orbitale et l'axe OY perpendiculaire au plan d'orbite.

A l'exception de programmes associés à des instruments au sol, le plus souvent en zone aurorale, les séquences de fonctionnement nominales couvrent les latitudes inférieures à 65°

et sur l'ensemble de la phase opérationnelle, la charge utile a effectivement fonctionné sur plus de 80% des orbites dans cet intervalle de latitudes.

Il y a 2 modes de fonctionnement :

- Burst : lorsque le satellite survole une zone sismique, les observations étant réalisées avec une grande résolution en temps et les formes d'ondes des champs électriques et magnétiques étant disponibles dans la gamme ELF, partiellement dans la gamme VLF.
- Survey : lorsque le satellite ne se situe pas au voisinage des zones sismiques, la résolution en temps des mesures étant plus faible et les données ondes étant essentiellement sous forme spectrale.

2.2.4- Repères

L'analyse et l'interprétation des données, obtenues au départ dans le repère des senseurs des instruments, nécessite de replacer, pour les comparer, les mesures dans différents repères, indiqués ci-dessous.

- Repère ICE, il est formé par les axes reliant les différentes électrodes utilisées pour les mesures, 12, 13 et 34. Ce n'est pas un repère orthonormé car les axes ne sont pas orthogonaux mais il est utile pour visualiser les mesures brutes, évaluer le comportement des électrodes et les méthodes pour corriger les défauts.
- Repère Satellite, défini par les axes OX, OY, OZ du satellite indiqués sur la *Figure 2.4*. La vitesse orbitale est dirigée suivant $-OZ$, la direction du nadir est OX, OY est perpendiculaire au plan d'orbite. Les axes 12 et 34 du repère ICE sont très voisins de OY et de OZ.

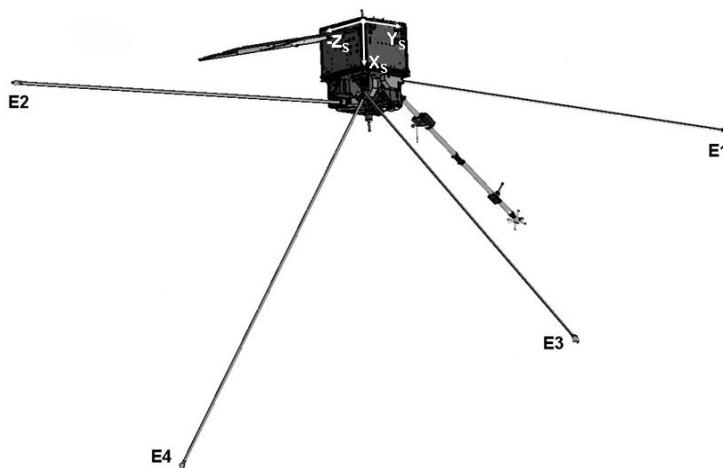


Figure 2.4. Axes X_s , Y_s , Z_s constituant le repère du satellite et position des électrodes de l'expérience ICE

- Repère Géocentrique local, défini par le schéma ci-dessous *Figure 2.5*

A.2.6. Geographic (geocentric) coordinate system

The geographic (GEO) coordinate system (Figure AN-5) is convenient for specifying the location of ground stations and ground-based experiments.

It is defined by:

- X_G axis towards the intersection of the Equator and the Greenwich meridian,
- Z_G axis parallel to the Earth's rotation axis (positive to the North),
- Y_G is defined through the cross product $Y_G = Z_G \wedge X_G$.

α_G is termed Greenwich mean sidereal time.

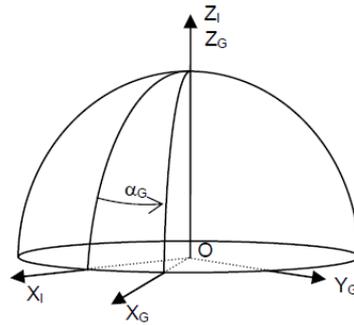


Figure AN-5. GEO coordinate system.

Figure 2.5. Repère géocentrique local.

- Repère Géomagnétique local,

L'axe Z_B est dirigé suivant le champ magnétique local, \mathbf{B} ; l'axe Y_B est parallèle au vecteur $\mathbf{B} \times \mathbf{OS}$ où O est le centre de la Terre et S la position du satellite, et X_B est égal à $Y_B \times Z_B$.

A.2.7. Local geomagnetic coordinate system

The local geomagnetic (LGM) coordinate system (Figure AN-6.) is defined versus the Earth magnetic field vector \vec{B}_0 :

- origin S at the centre of the satellite,
- Z_B is parallel to the \vec{B}_0 field vector,
- $Y_B = (\vec{Z}_B \wedge \vec{POS}) / |\vec{Z}_B \wedge \vec{POS}|$,
- $X_B = Y_B \wedge Z_B$ (located in the plane $[\vec{POS}, \vec{B}_0]$).

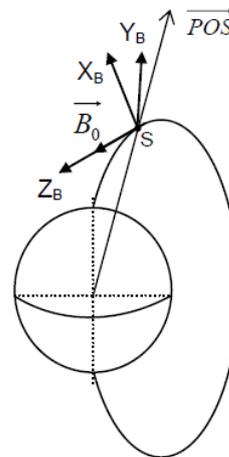


Figure 2.6. Repère géomagnétique local

Le repère Géomagnétique Local permet également d'exprimer des relations simples entre certains paramètres qui découlent de la physique du plasma ionosphérique. Dans ce repère les composantes du champ électrique sont: $E_{b1}, E_{b2}, E_{b3} \sim 0$, puisque la composante du champ électrique le long de \mathbf{B} , associée à la diffusion du plasma le long des lignes de force est de l'ordre de la dizaine de $\mu\text{V/m}$, donc négligeable par rapport aux composantes transverses. Les lignes de force du champ magnétique terrestre sont ainsi considérées comme équipotentielles.

La vitesse dans le plan perpendiculaire au champ magnétique, de composantes, V_{b1} et V_{b2} , est la vitesse de dérive V_D due au champ électrique donnée par la relation :

$$\mathbf{V}_D = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2 \quad (2.1)$$

On a donc les relations suivantes entre V_{b1}, V_{b2} et E_{b1}, E_{b2}

$$V_{b1} = E_{b2} / B \quad (2.1a)$$

$$V_{b2} = -E_{b1} / B \quad (2.1b)$$

La composante V_{b3} de la vitesse le long du champ magnétique est la conséquence (i) de la diffusion du plasma (principalement sous l'effet des gradients de densité et de température) et/ou (ii) de l'interaction avec les neutres comme c'est le cas, notamment, en présence d'oscillations de la haute atmosphère lors du passage d'ondes de gravité.

2.3- Expérience ISL

L'expérience ISL (Instrument Sonde de Langmuir) accède à deux paramètres fondamentaux du plasma ionosphérique, la densité N_e et la température T_e électroniques du plasma local. L'une des spécificités de ces 2 paramètres, surtout T_e , est la rapidité de leur réponse, le long des lignes de force du champ magnétique terrestre, aux perturbations qui peuvent affecter l'ionosphère. La température électronique est ainsi un bon traceur des dépôts d'énergie le long des lignes de force du champ magnétique. N_e et T_e sont donc des données essentielles pour la physique de l'ionosphère et la météorologie de l'espace.

L'expérience ISL (*Lebreton et al., 2006*) est constituée de 2 sondes de Langmuir, une sonde cylindrique de petite dimensions et une sonde sphérique pourvue d'un ensemble de calottes indépendantes sur chacune desquelles on mesure le courant collecté. Cette sonde est destinée à une étude fine du sillage d'un objet de forme simple dans le plasma et n'a été mise en œuvre que pour des tests limités. La sonde cylindrique est utilisée pour les mesures opérationnelles et a donc fourni les données disponibles dans la base de données DEMETER. Nous les avons utilisées essentiellement pour les comparer aux mesures de densité des ions O^+ souvent plus sensibles aux perturbations que nous avons mises en évidence.

Le principe de la mesure de N_e et T_e par sonde de Langmuir est simple : on fait varier le potentiel ϕ appliqué à la sonde et on mesure le courant collecté, I , l'analyse de la caractéristique courant/tension $I(\phi)$ conduisant à la densité et la température électroniques. Lorsque la sonde est polarisée assez négativement ($< -2/-3V$) par rapport au potentiel plasma local elle collecte pratiquement uniquement des ions puis, lorsque le potentiel se rapproche du potentiel plasma la sonde collecte à la fois des électrons et des ions, le courant électronique

devenant rapidement largement supérieur au courant ionique à cause de la très grande vitesse thermique des électrons et variant comme

$$I_e = I_{e0} \cdot \exp(e \cdot \delta\phi / kT_e) \quad (2.2)$$

Cette partie de la caractéristique est appelée « retardatrice » car la variation de potentiel de la sonde permet de caractériser la distribution en énergie des électrons thermiques, c'est-à-dire leur température, T_e , comme le montre la relation ci-dessus.

Pour des potentiels supérieurs au potentiel plasma on se trouve dans la partie de « saturation » et le courant collecté n'augmente que faiblement avec le potentiel suivant une loi parabolique pour une sonde cylindrique. Le point de cassure entre ces 2 régions marque le potentiel plasma où le courant collecté est donné par la relation :

$$I_{e0} \sim eSN_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

Où S est la surface de la sonde, m_e la masse des électrons.

Connaissant T_e par l'analyse de la partie retardatrice de la caractéristique on déduit de la valeur de I_{e0} la densité électronique N_e .

Quel que soit le mode de fonctionnement de DEMETER ISL fournit une mesure de N_e et de T_e par seconde.

2.4- Expérience IAP

2.4.1- Introduction

L'analyseur d'ions IAP (*Instrument d'Analyse du Plasma*) (J.J. Berthelier et al., 2006a) a été sélectionné dans la charge utile scientifique de DEMETER pour fournir la composition de la population d'ions thermiques, c'est-à-dire les densités des 3 espèces majoritaires H^+ , He^+ , O^+ et, dans des conditions de forte activité magnétique, des ions moléculaires tels NO^+ , leur température T_i et leur vitesse d'ensemble V_i . Ces paramètres sont extrêmement variables le long de l'orbite de DEMETER et d'une orbite à l'autre ce qui a fortement contraint les spécifications de cet instrument. En raison des variations de l'activité solaire au cours de la phase opérationnelle de DEMETER, les densités ioniques à ~ 650-700 km d'altitude couvrent une gamme étendue de ~ 10^2 à ~ $5 \cdot 10^4$ ions / cm^3 avec des températures variant de ~ 800K à 2500K, éventuellement plus élevées à haute latitude. La densité relative des différentes espèces ioniques individuelles peut chuter à des valeurs très faibles, souvent moins de 1% de la densité du plasma total pour les ions légers H^+ et He^+ . Les vitesses de dérive du plasma se situent entre de très faibles valeurs à moyenne latitude, de l'ordre de quelques dizaines de m/s,

jusqu'à des vitesses supérieures à 1,5 km/s dans la zone aurorale, voire davantage dans les bulles de plasma équatoriales supersoniques (Aggson *et al.*, 1992). A moyenne latitude, la plupart des perturbations à grande échelle (supérieures à ~1000 km) sont engendrées par les phénomènes de haute latitude induits par les perturbations magnétosphériques. A des échelles spatiales inférieures (quelques dizaines à quelques centaines de km), on observe le plus souvent des perturbations ionosphériques itinérantes engendrées par les ondes de gravité atmosphériques avec des périodes de l'ordre de 100s à 1000s. Les instabilités du plasma, en particulier dans les régions équatoriales, sont responsables de perturbations de petite échelle s'étendant de quelques dizaines de kilomètres à quelques dizaines de mètres le long de l'orbite. Les variations de température et de vitesse sont moins documentées mais des variations respectivement entre 50K et 300K et entre 10 ms^{-1} et 100 ms^{-1} peuvent être attendus à méso-échelle.

2.4.2- Description de l'instrument

La technique développée par W.B Hanson (*Hanson et Heelis*, 1975) est bien adaptée à des mesures sur des satellites en orbite basse (LEO) dans la région supérieure de F-région en dessous de ~ 1000 km d'altitude. Les 3 ions principaux H^+ , He^+ et O^+ , avec des masses dans des rapports 4 peuvent facilement être séparés à des vitesses orbitales de nombre de Mach élevé (> 3 à 5).

Le principe de mesure est simple et s'appuie sur 2 analyseurs indépendants, APR et ADV.

2.4.2.1- Analyseur APR

APR (Analyseur à Potentiel Retardateur) est représenté schématiquement sur la *Figure 2.7*. Il effectue l'analyse en énergie des ions incidents en faisant varier le potentiel V_{gr} appliqué à la grille retardatrice que doivent traverser les ions et en mesurant simultanément le courant collecté I_c sur le collecteur c'est-à-dire le nombre d'ions qui ont une énergie supérieure à qV_{gr} et peuvent atteindre le collecteur. A partir de la courbe $I_c(V_{gr})$ un traitement classique (*Hanson et Heelis*, 1975), détaillé brièvement au paragraphe suivant, permet de déterminer les densités des ions majoritaires O^+ , He^+ , H^+ , leur température T_i , la composante V_i de leur vitesse le long de la direction de visée de l'analyseur et le potentiel du satellite ϕ_S par rapport au plasma local. Ce potentiel est celui de la masse électrique du satellite qui est appliqué à toutes les grilles à 0V et au collecteur lui-même à 0V.

On suppose que la température et la vitesse d'ensemble sont identiques pour les différentes espèces ioniques ce qui est une hypothèse la plupart du temps raisonnable aux latitudes moyennes et basses.

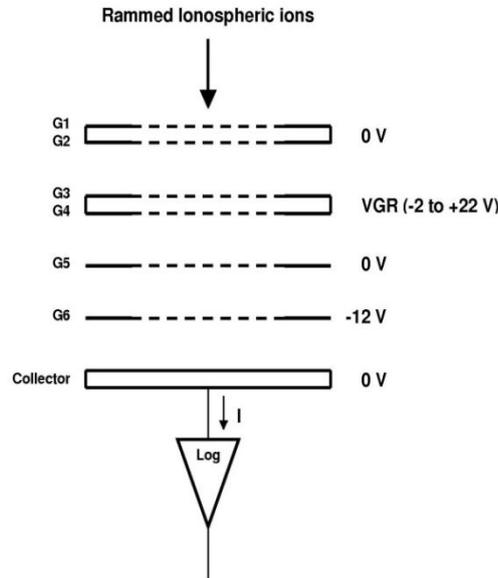


Figure 2.7. Schéma de principe de l'analyseur APR

Les deux entrée grilles G1 et G2, au 0V électrique, protègent le plasma des potentiels appliqués aux autres grilles à l'intérieur de l'analyseur et évitent donc les perturbations des trajectoires des ions avant leur entrée dans l'instrument. La grille double G3 + G4 est la grille retardatrice utilisée pour effectuer l'analyse en énergie des ions incidents. L'utilisation d'une grille double permet d'obtenir un potentiel retardateur uniforme dans leur plan médian, sans les perturbations périodiques liées à la maille présentes au niveau d'une grille simple. Dans les modes de fonctionnement standard, V_{gr} varie de -2V à +22V. Au potentiel de +22V aucun ion thermique ne pouvant franchir la barrière de potentiel, on mesure le bruit de fond du courant I_c . Les grilles G5 et G6 sont polarisées aux potentiels fixes de 0V et -12V respectivement. La tension négative sur G6 empêche les photoélectrons ionosphériques ou les électrons supra-thermiques présents dans les aurores et d'énergie inférieure à ~12 eV d'atteindre le collecteur, ce qui maintient les courants parasites sur le collecteur à des niveaux suffisamment faibles. G6 repousse également les photoélectrons d'énergie inférieure à 12 eV émis par le collecteur lorsqu'il est illuminé par le Soleil. Une partie de ces photoélectrons a une énergie supérieure à 12 eV mais la géométrie de l'orbite ainsi que l'attitude du satellite sont telles que les cas d'illumination directe susceptible de produire des courants photoélectriques important sont rares et, dans ces situations, le courant parasite correspondant

peut être déterminé pour $V_{gr}=+22V$ et les mesures corrigées en conséquence. G5 et G6 étant maintenues à des tensions fixes, agissent également comme un écran électrostatique pour supprimer les perturbations de la mesure du courant induit par le couplage capacitif entre la double grille de balayage G3 et G4 et le collecteur.

L'amplificateur de courant connecté au collecteur est un amplificateur logarithmique travaillant dans une gamme $10^{-11}A$ à $10^{-7}A$. Le traitement des données brutes de APR fournit une précision relative meilleure que $\sim 1\%$ pour la densité d'ions O^+ lorsque celle-ci est $> \sim 10^2$ ions/cm³. La précision est de $\sim 5\%$ pour les densités plus faibles jusqu'à un seuil de ~ 10 à 20 ions/cm³ au-dessous duquel l'algorithme opérationnel utilisé pour traiter les données ne fonctionne pas assez bien et doit être remplacé par un algorithme dédié supervisé.

Il est important de bien comprendre pourquoi l'analyse en énergie des ions incidents permet de mesurer simultanément la composante $V_i = -V_{S/C} + V_z$ de la vitesse totale des ions dans le plasma parallèle à l'axe de l'analyseur OZ et le potentiel ϕ_s du satellite. Celui-ci crée, dans la gaine qui entoure le satellite, un champ électrique dirigé vers le satellite si $\phi_s < 0$ et dirigé vers le plasma si $\phi_s > 0$. Dans le premier cas les ions sont accélérés avant d'atteindre l'entrée des analyseurs, dans le second cas ils sont freinés. En faisant l'hypothèse légitime d'une gaine plane devant l'entrée des analyseurs on aboutit pour exprimer la variation correspondante de la vitesse des ions au schéma de la *Figure 2.8* et aux calculs suivants :

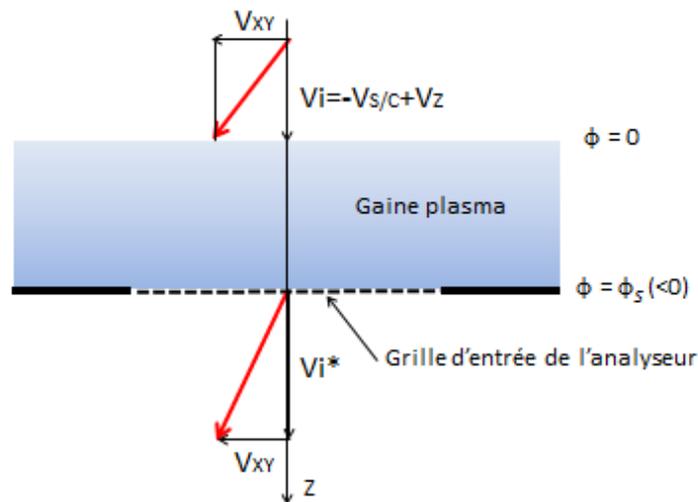


Figure 2.8. Effet du potentiel satellite sur la vitesse des ions à l'entrée des analyseurs

Les composantes de la vitesse des ions V_x et V_y dans le plan [XY] perpendiculaire à OZ ne varient pas puisqu'elles sont perpendiculaires au champ électrique dans la gaine. Par contre la composante de la vitesse des ions le long de l'axe OZ, $V_i = -V_{S/C} + V_z$, varie entre leur entrée dans la gaine devant les analyseurs et leur entrée dans les analyseurs eux-mêmes

puisque les ions sont accélérés ou ralentis lorsqu'ils traversent la gaine. En exprimant la conservation de l'énergie entre l'entrée dans la gaine (plasma non perturbé) et l'arrivée sur la grille d'entrée des analyseurs où la composante de la vitesse totale le long de OZ est V_i^* , on obtient :

$$\frac{1}{2}m_iV_i^{*2} = \frac{1}{2}m_iV_i^2 - q\phi_S \quad (2.4)$$

L'analyseur APR mesure la distribution de l'énergie le long de l'axe de l'analyseur des ions incidents c'est-à-dire le terme $\frac{1}{2}m_iV_i^{*2}$ puisque les ions qui atteignent l'analyseur ont auparavant traversé la gaine du satellite. Si on prend 2 ions de masses m_1 et m_2 différentes (par exemple H^+ avec $m_1=1 \text{ uma}$ et O^+ avec $m_2 = 16 \text{ uma}$) l'utilisation de la relation (2.4) pour chaque espèce fournit 2 équations

$$\frac{1}{2}m_1V_i^{*2} = \frac{1}{2}m_1V_i^2 - q\phi_S \quad (2.5a)$$

$$\frac{1}{2}m_2V_i^{*2} = \frac{1}{2}m_2V_i^2 - q\phi_S \quad (2.5b)$$

On voit donc que l'utilisation de 2 ions de masses différentes permet de séparer dans la distribution des énergies $\frac{1}{2}m_iV_i^{*2}$ mesurées par APR la contribution de la vitesse totale des ions dans le plasma $V_i = -V_{S/C} + V_z$ et celle de l'accélération des ions dans la gaine $-q\phi_S$ donc de mesurer indépendamment V_i (donc V_z) et ϕ_S . Il faut remarquer que ce traitement fournit des résultats corrects quand les densités d'au moins 2 espèces ioniques sont supérieures au seuil de détection de APR mais est en défaut lorsque la densité des ions minoritaires (le plus souvent H^+ et He^+) est $\sim < 10/20 \text{ ions/cm}^3$.

2.4.2.2- Analyseur ADV

Le second analyseur (ADV, Analyseur de Direction de Vitesse) mesure la direction de la vitesse moyenne des ions à l'entrée dans l'analyseur, donc la direction de cette vitesse dans le repère du satellite.

La *Figure 2.9a* montre un schéma du principe de fonctionnement de l'analyseur de ADV. Les deux grilles G1 à 0V et G2, à un potentiel fixe V2, empêchent les potentiels appliqués sur les autres grilles internes de s'étendre dans le plasma externe, ce qui évite de perturber les trajectoires des ions avant l'entrée dans l'analyseur. Le potentiel V2 est utilisé pour bloquer les ions H^+ : ceux-ci ayant un nombre de Mach très inférieur à celui des ions O^+ (à cause de leur masse 16 fois plus faible) ont une distribution angulaire trop large pour que la mesure de la direction d'arrivée par un système simple comme celui de ADV fournisse des résultats

précis. Ils détériorent ainsi la mesure de la direction d'arrivée des ions plus lourds. Au cours de la phase opérationnelle de DEMETER, V2 a été maintenu à +2V donc seuls les ions He^+ , généralement très minoritaires donc sans influence significative sur les courants mesurés, et, principalement, les ions O^+ sont pris en compte. Les grilles G3 et G4 à 0V sont montées sur un support qui constitue un diaphragme carré de côté 2L pour définir l'ouverture effective de l'analyseur. Les grilles G5 et G6, à 0V précèdent la grille G7 polarisée à -12V qui joue le même rôle vis-à-vis des électrons suprathermiques et des photoélectrons que la grille G6 de APR. Les dimensions du diaphragme, L, et sa distance au collecteur, H, déterminent la fonction de transfert de l'instrument et sa sensibilité.

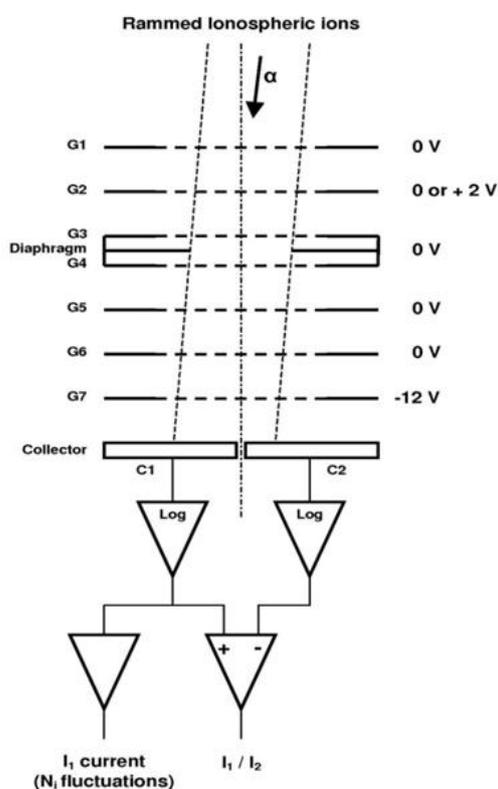


Figure 2.9a. Schéma de principe de l'analyseur ADV

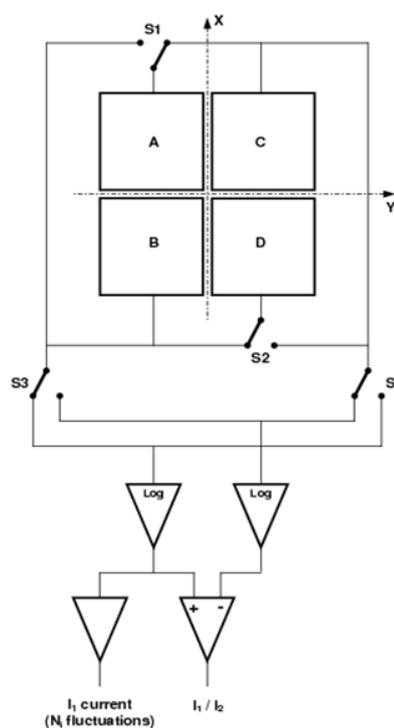


Figure 2.9b. Schéma montrant la structure en 4 quadrants du collecteur de ADV

Figure 2.9. (a) Schéma de principe de l'analyseur ADV, (b) Schéma montrant la structure en 4 quadrants du collecteur de ADV

Le collecteur de ADV est divisé en quatre quadrants isolés, comme le montre la Figure 2.9b où les axes X et Y correspondent aux axes X et Y du satellite. Ces 4 quadrants peuvent être associés par paires, dans 2 configurations différentes. Dans la première, les quadrants sont associés de telle sorte que $C_1=A+B$ et $C_2=C+D$ et les deux collecteurs C1 et C2 sont symétriques par rapport au plan (X, Z) du satellite. Dans le deuxième cas, les collecteurs C_1 et

C_2 sont définies par $C_1=A+C$ et $C_2=B+D$ et sont symétriques par rapport au plan (Y, Z) du satellite.

Un modèle simple de collection de courant conduit à l'expression suivante concernant le rapport I_1/ I_2 des courants d'ions recueillis par $C1$ et $C2$ à l'angle α entre la vitesse moyenne des ions et les plans (X, Z) ou (Y, Z).

$$\text{Log}(I_1/I_2) = (L- 2H\tan\alpha)/(L+2H\tan\alpha) \quad (2.6)$$

Comme le montre la *Figure 2.10*, dans la première configuration α correspond à l'angle d'inclinaison ϕ de la vitesse d'ensemble V des ions à l'entrée dans ADV par rapport au plan (X,Z) qui est le plan d'orbite. Dans la seconde configuration, l'angle α est l'inclinaison θ de la vitesse d'ensemble par rapport au plan (Y,Z) horizontal. A moyenne et basse latitude, les vitesses transverses des ions à l'entrée de ADV sont faibles, les angles ϕ et θ petits et on peut négliger le couplage des 2 angles donc déterminer ϕ et θ indépendamment.

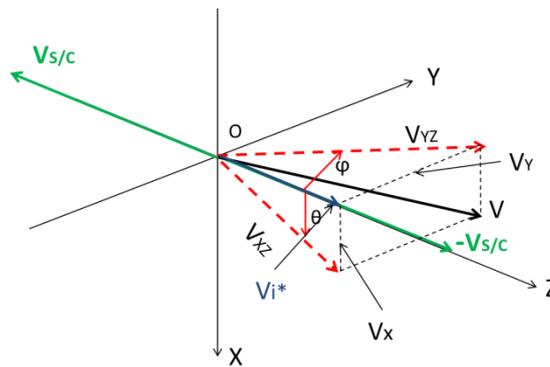


Figure 2.10. Composantes des vitesses ioniques à l'entrée des analyseurs

La *Figure 2.10* permet de visualiser de façon précise, dans le référentiel du satellite, les composantes de la vitesse des ions mesurée par IAP.

V est la vitesse totale des ions lorsqu'ils pénètrent dans l'analyseur.

$$\mathbf{V} = V_X \cdot \mathbf{i} + V_Y \cdot \mathbf{j} + V_i^* \cdot \mathbf{k} \quad (2.7)$$

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ sont les vecteurs unitaires sur les axes OX, OY et OZ du satellite et V_X, V_Y, V_Z les composantes de la vitesse d'ensemble des ions dans le plasma exprimées dans le repère du satellite. Un changement de repère permet de relier ces composantes dans le repère du satellite aux composantes V_{b1}, V_{b2}, V_{b3} dans le repère géomagnétique local défini au paragraphe 2.2.4.

L'analyseur ADV mesure les angles effectifs de la direction de la vitesse des ions à l'entrée de l'analyseur. La composante de la vitesse le long de l'axe de l'analyseur vue par ADV est V_i^* qu'on peut calculer en utilisant les valeurs V_Z et ϕ_S fournies par APR.

$$V_i^* = \left[V_i^2 - 2 \cdot \frac{q}{m_i} \cdot \phi_S \right]^{\frac{1}{2}} = \left[(-V_{S/C} + V_Z)^2 - 2 \cdot \frac{q}{m_i} \cdot \phi_S \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Dans la relation (2.8) la masse à prendre en compte est celle de O^+ puisque, pour le fonctionnement opérationnel de ADV, les ions H^+ sont éliminés par le potentiel $V_2=+2V$ appliqué à la grille G2 et en supposant que les ions He^+ sont très minoritaires. Donc $2 \cdot \frac{q}{m_i} \sim 1.2 \cdot 10^{-7}$ et

$$V_i^* = \left[(-V_{S/C} + V_Z)^2 - 1.2 \cdot 10^{-7} \cdot \phi_S \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

En utilisant les valeurs des angles φ et θ fournies par ADV on obtient donc :

$$V_Y = V_i^* \cdot \tan\varphi \quad (2.10a)$$

$$V_Z = V_i^* \cdot \tan\theta \quad (2.10b)$$

Au total, en combinant les données des 2 analyseurs APR et ADV, on obtient donc les 3 composantes de la vitesse d'ensemble des ions dans le repère du satellite. Cette technique a été développée et affinée au long des années (*Hanson et al*, 1973 ; *Heelis et Hanson*, 1998) et de nombreux instruments similaires embarqués sur des satellites en orbite LEO, ont fourni une contribution essentielle à la connaissance globale de la région F supérieure de l'ionosphère jusqu'à des altitudes de l'ordre de 1500 km.

2.4.3- Modes de fonctionnement

En mode « *Survey* », IAP a 2 modes de fonctionnement:

- *Survey 1* correspond à une résolution en énergie moyenne sur APR avec 28 pas de 12,8 ms pour V_{gr} . Pendant ce mode, un ensemble complet de paramètres du plasma peut être calculé toutes les 360 ms mais la base de données fournit une moyenne sur la durée de 2 pages TM, soit 4.506s

- *Survey 2*, la mesure APR correspond à une meilleure résolution en énergie avec 56 pas de 12,8 ms pour V_{gr} . Pendant ce mode, un ensemble complet de paramètres du plasma peut être calculé toutes les 720 ms. Les fluctuations de la somme des densités des ions He^+ et O^+ par mesure rapide du courant sur le collecteur C_1 d'ADV sont disponibles avec une résolution de temps constant de 12,8 ms. La base de données fournit une moyenne sur 4.429s

Dans le mode « *Burst* » mode, IAP a un seul mode de fonctionnement donnant une bonne résolution en énergie et en temps avec 56 pas de 6.4 ms pour V_{gr} . Un ensemble complet de paramètres du plasma peut être obtenu toutes les 360 ms et les fluctuations de la somme des

densités $[N(\text{He}^+)+N(\text{O}^+)]$ sont disponibles avec une résolution de 6.4 ms. La base de données fournit une moyenne sur 2.317s

2.5- Expérience ICE

L'expérience ICE (*J.J. Berthelier et al., 2006b*) a été conçue pour mesurer les vecteurs champs électriques entre le continu et une fréquence maximum de 3.2 MHz. Les champs électriques, dans l'ensemble de cette large gamme de fréquences, constituent une grandeur physique essentielle pour tous les phénomènes ionosphériques : convection et dynamique du plasma (champs électriques DC et ULF), interactions ondes particules (champs électriques ELF, VLF), émissions d'ondes par les instabilités du plasma lui-même (champs électriques HF du Rayonnement Kilométrique Auroral par exemple) ou par des phénomènes extérieurs (perturbations électrostatiques ou ondes électromagnétiques engendrées au niveau des foyers orageux actifs) pour toute la gamme de fréquence. C'est donc une mesure indispensable pour la physique de l'ionosphère et la météorologie de l'espace. Les champs électriques constituent aussi un domaine exploratoire crucial pour la recherche d'éventuels effets ionosphériques de l'activité sismique puisqu'une grande partie des articles publiés font état de modification des signaux naturels ou de génération de signaux sismiques proprement dits dans l'ensemble des fréquences couvertes par ICE. Enfin, les observations fournies par ICE sont centrales lorsqu'on s'intéresse à l'influence sur l'environnement lointain de la Terre des nombreux émetteurs de forte puissance dans les gammes VLF et HF.

2.5.1- Description de l'expérience

L'expérience ICE fonctionne suivant le principe des sondes dipolaires qui sera décrit au paragraphe 2.5.2. L'instrument utilise comme senseurs 4 électrodes sphériques S_1, S_2, S_3, S_4 installées à l'extrémité de 4 bas télescopiques déployés en orbite et d'une longueur de $\sim 4\text{m}$ (*Figure 2.11*). En associant deux senseurs, par exemple S_1 et S_2 , on constitue une sonde dipolaire classique qui mesure la composante le long de l'axe 12 des champs électriques DC et AC. Les couples S_3, S_4 et S_1, S_3 constituent deux autres sondes dipolaires et l'ensemble de ces mesures permet d'accéder à la mesure vectorielle des champs électriques dans l'ensemble de la gamme de fréquence couverte par l'expérience. A l'intérieur de chaque électrode est intégrée l'électronique de proximité, identique pour les 4 électrodes, qui comprend un préamplificateur et un circuit générant le courant de polarisation imposé à l'électrode. Les signaux de sortie des préamplificateurs sont envoyés au module BANT à l'intérieur du satellite qui assure le traitement des signaux bruts dans 4 gammes de fréquence

(amplification, numérisation et calculs de spectres) puis l'envoi des données traitées vers le système de bord du satellite où elles sont mises en mémoire pour être ultérieurement retransmises aux stations de réception. Cette électronique de traitement gère également les télécommandes qui permettent de commander les modes de fonctionnement de l'expérience.

2.5.1.1- Senseurs

La disposition des bras télescopiques et des senseurs est indiquée sur la *Figure 2.11*. Les senseurs S_1 et S_2 sont positionnés pratiquement le long de l'axe Y de DEMETER perpendiculaire au plan de l'orbite, les senseurs S_3 et S_4 sont situés sous le satellite (donc dans la direction du nadir), pratiquement dans le plan orbital et la direction S_3S_4 est très voisine de l'axe OZ du satellite. Les 2 couples de senseurs S_1S_2 et S_3S_4 donnent donc les 2 composantes « horizontales » des champs électriques, perpendiculaire au plan orbital pour la première, parallèle à celui-ci pour la deuxième. Les mesures du troisième couple de senseurs S_1, S_3 associées aux deux précédentes permettent de déterminer la composante « verticale » des champs électriques suivant OX.

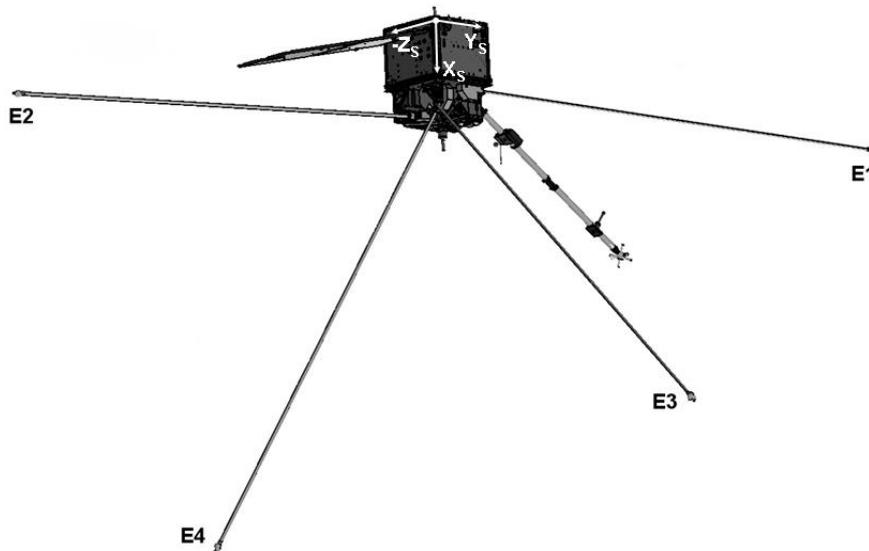


Figure 2.11. Disposition des senseurs de l'expérience ICE

Les conditions de l'ionosphère le long de l'orbite de DEMETER sont telles que la longueur de Debye est, en général, inférieure à 20cm ce qui met les différents senseurs en dehors de la gaine de plasma qui entoure le satellite et les panneaux solaires et, également, en dehors du sillage du satellite et de ses appendices. Pour diminuer les perturbations générées par le satellite, la surface de celui-ci a été recouverte en grande partie par une enveloppe conductrice

en kapton chargée au carbone donc conductrice et connectée au 0V électrique. Pour la même raison, la surface externe des cellules solaires est recouverte d'un dépôt d'oxyde d'étain conducteur au 0V électrique.

Les 4 senseurs sont des sphères en aluminium recouvertes d'une résine époxy conductrice chargée au carbone. Ce matériau a été retenu parce que les tests sur des échantillons au laboratoire ont montré une bonne uniformité et une bonne reproductibilité du potentiel de surface (ou potentiel de contact), qualités essentielles pour les mesures du champ électrique continu.

2.5.1.2- Traitement des signaux à bord de DEMETER et données transmises au sol

En utilisant les signaux fournis par les senseurs, on mesure les 3 composantes E_{12} , E_{34} and E_{13} des champs électriques DC et AC dans 4 gammes de fréquences et, en fonction des modes de fonctionnement de ICE et du satellite (modes « Survey » et « Burst ») et des gammes de fréquences, tout ou partie des données sont stockées dans la mémoire de masse puis transmises au sol lors du passage du satellite au-dessus des stations de réception de la télémétrie soit comme « forme d'ondes » soit, après traitement plus complet à bord, sous la forme de spectres.

Les signaux sont divisés en 4 bandes de fréquence :

- DC et UBF [0-15 Hz]

Les potentiels des 4 senseurs S_1 , S_2 , S_3 , S_4 sont numérisés à la cadence de 39.0625 Hz sous 16 bits ce qui correspond à une résolution de 0.3 mV pour les potentiels $U_1..U_4$ et, étant donné les distances entre senseurs, de ~ 40 à $50\mu\text{V/m}$ pour les champs électriques sur les axes ij . Les potentiels $U_1..U_4$ sont disponibles dans tous les modes de fonctionnement du satellite.

- ELF [15 Hz-1 kHz]

En mode "Survey" seuls les spectres sont disponibles, en mode "Burst" les formes d'onde des 3 composantes 12, 34, 13 sont transmises directement.

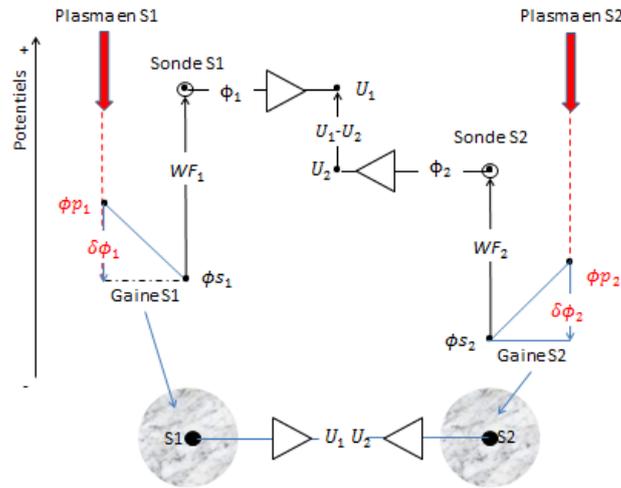
- VLF [15 Hz-17.4 kHz]

- HF [10 kHz-3.175 MHz]

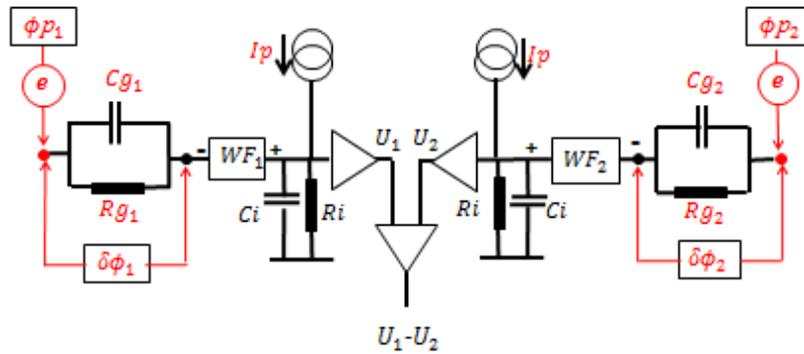
Comme les données utilisées dans ce travail sont essentiellement les champs électriques DC et ULF, complétés pour certains événements par des mesures ELF, les signaux VLF et HF ne sont pas abordés dans ce paragraphe, le lecteur intéressé pouvant trouver une information détaillée dans *J.J. Berthelier et al. (2006)*.

2.5.2- Principe de mesure des sondes dipolaires et conséquences expérimentales

Les Figures 2.12a et 2.12b présentent les schémas physique et électronique qui illustrent le principe de fonctionnement d'une sonde dipolaire pour la mesure des champs électriques DC et AC.



(a) Principe physique de la mesure des champs électriques par sonde dipolaire



(b) Schéma électronique du fonctionnement d'une sonde dipolaire

Figure 2.12. (a) Principe physique de la mesure des champs électriques par sonde dipolaire,

(b) Schéma électronique du fonctionnement d'une sonde dipolaire

La mesure consiste à déterminer la différence entre les potentiels locaux du plasma ϕ_{p1} et ϕ_{p2} aux positions des 2 sondes S_1 et S_2 . La différence $\Delta\phi_{12} = \phi_{p1} - \phi_{p2}$ fournit la composante du champ électrique E'_{12} mesurée dans le repère du satellite le long de la direction \mathbf{l}_{12} par la relation :

$$E'_{12} = (\phi_{p1} - \phi_{p2})/d_{12} \quad (2.11)$$

où d_{12} est la distance entre les sondes S_1 et S_2 .

En présence du champ magnétique terrestre, le mouvement orbital du satellite crée, dans le repère du satellite, un champ électrique induit $\mathbf{D} = \mathbf{V}_{S/C} \times \mathbf{B}$ dont la composante D_{12} s'ajoute au champ électrique naturel dans l'ionosphère E_{12} et la composante du champ électrique mesurée dans le repère du satellite est donc :

$$E'_{12} = E_{12} + D_{12} \quad (2.12)$$

Chaque électrode fonctionne comme une sonde de Langmuir (on a abordé brièvement la théorie au paragraphe 2.3) et collecte un courant qui est la somme des courants portés par les électrons et les ions du plasma qui atteignent la surface de la sonde.

Lorsque le potentiel de l'électrode est voisin du potentiel local du plasma, comme c'est le cas dans ICE, le courant ionique résulte essentiellement de l'effet de vitesse soit, à moyenne et basse latitude où les vitesses de dérive du plasma sont faibles, $I_i \sim A_s \cdot V_{S/C}$ où $A_s = \pi \cdot \rho_s^2$ (ρ_s rayon de la sonde) est le maître couple de la sonde.

La partie du courant portée par les électrons I_e est donnée par la formule :

$$I_e = I_{e0} \cdot \exp(e \cdot \delta\phi / kT_e) \quad (2.13)$$

$$I_{e0} \sim eSN_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} = eS \frac{N_e v_{the}}{4} \quad (2.14)$$

- S est la surface de la sonde $S = 4\pi\rho_s^2$

- I_{e0} est le courant électronique collecté lorsque la surface de la sonde est au potentiel plasma $\phi_s = \phi_p$

- $\delta\phi$ est le potentiel de la surface de la sonde par rapport au plasma local, c'est-à-dire la différence de potentiel entre la surface de la sonde et le bord de la gaine qui entoure la sonde dans le plasma dont on admet que le potentiel moyen est celui du plasma au centre de l'électrode.

- $\delta\phi_i = \phi_{s_i} - \phi_{p_i}$ dépend du courant total collecté par la sonde, de la densité et température électroniques N_e, T_e , de la composition et température ioniques N_i, T_i ainsi que de la vitesse de déplacement de la sonde par rapport au plasma (égale à la somme vectorielle de la vitesse orbitale du satellite $\mathbf{V}_{S/C}$ et de la vitesse d'ensemble du plasma dans un repère terrestre).

Dans la suite de ce paragraphe nous allons traiter deux questions qui, sur le plan expérimental, jouent un rôle essentiel sur le fonctionnement de ICE et la qualité des mesures.

- Travail de sortie.

La première question concerne le terme WF indiqué sur les schémas : il s'agit du « travail de sortie », « work function » en anglais, - souvent dénommé par les utilisateurs de sondes de Langmuir « potentiel de surface » (ou « de contact »)- du matériau constituant la surface du senseur en contact avec le plasma. On voit que ce terme s'ajoute au potentiel local du plasma et à la chute de potentiel dans la gaine entourant le senseur et que la différence

$$WF_{12}=WF_1-WF_2$$

va conduire à une erreur WF_{12}/d_{12} lorsque l'on détermine le champ électrique le long de l'axe des 2 senseurs S_1S_2 . Dans un conducteur les électrons de la bande de conduction qui sont les porteurs de charge des courants qui circulent dans le matériau sont au « potentiel de Fermi » plus positif que le potentiel de la surface. Cette barrière de potentiel empêche qu'ils soient éjectés spontanément du matériau et explique l'effet photo-électrique où, pour extraire les électrons, les photons doivent avoir une énergie minimum égale au potentiel de Fermi analogue au « travail de sortie » du matériau. Lorsqu'on polarise une électrode à un potentiel ϕ par rapport au 0V de l'électronique, les électrons de la bande de conduction sont à un potentiel ϕ mais *le potentiel de la surface qui est celui que voient les électrons et les ions du plasma est égal à $\phi_s = \phi - WF$* , comme indiqué sur la *Figure 2.12a*. A partir du schéma de la *Figure 2.12a* on peut écrire :

$$\begin{aligned}\phi_{p_1} + \delta\phi_1 + WF_1 &= U_1 \\ \phi_{p_2} + \delta\phi_2 + WF_2 &= U_2 \\ \phi_{p_1} - \phi_{p_2} &= (E_{12} + D_{12}) \cdot d_{12}\end{aligned}$$

D'où :

$$E_{12} \cdot d_{12} = (U_1 - U_2) - (\delta\phi_1 - \delta\phi_2) - (WF_1 - WF_2) - D_{12} \cdot d_{12} \quad (2.15)$$

On verra au paragraphe suivant que les électrodes sont polarisées avec un même courant de polarisation I_p donc les différences des potentiels de surface des électrodes par rapport au plasma $\delta\phi_1$ et $\delta\phi_2$ sont identiques et le deuxième terme de l'équation (2.15) est nul, d'où l'équation finale :

$$E_{12} \cdot d_{12} = [(U_1 - U_2) - D_{12} \cdot d_{12}] - WF_{12} = UD_{12} - WF_{12} \quad (2.16)$$

où WF_{12} est la différence des travaux de sortie des sondes 1 et 2.

Puisque le terme $D_{12} \cdot d_{12}$ peut être calculé au moyen des données d'orbitographie et des modèles du champ magnétique terrestre, l'erreur sur la mesure du champ électrique E_{12} déduit de la relation (2.16) est donc uniquement due au terme WF_{12}

Sans entrer dans les détails il suffit de savoir que sur la surface d'un même matériau le travail de sortie WF peut varier significativement pour des raisons liées à la structure cristalline ou non du matériau, aux gaz absorbés en surface, à la modification de la surface et de ses propriétés d'absorption des gaz absorbés par le bombardement par des particules énergiques ou par la collection d'un courant de particules thermiques etc... Ainsi, en orbite, le potentiel de surface d'une électrode n'est pas uniforme et 2 électrodes d'un même matériau ont des potentiels de surface moyens différents. Les dépôts de carbone colloïdaux sur la surface des électrodes (obtenus, dans le cas de ICE, en revêtant les électrodes de l'expérience ICE par une résine chargée au carbone) permettent en général d'obtenir une assez bonne uniformité du potentiel de surface avec un écart-type de l'ordre de quelques dizaines de mV (au laboratoire) et des différences de potentiels moyens de l'ordre de quelques dizaines de mV (au laboratoire). Dans la pratique, et lorsque les électrodes ne peuvent pas être protégées jusqu'à leur déploiement en orbite, les pollutions principalement par les gaz absorbés pendant les dernières phases d'intégration et au cours du lancement (résidus de propulsion, gaz des thrusters,...) peuvent conduire à des différences de potentiel de l'ordre de 50mV à 100mV qui restent indéterminées. On voit donc que la question des potentiels de surface constitue une des difficultés pratiques majeures pour la mesure du champ électrique DC. Même avec des distances entre électrodes de l'ordre de 8 à 10m l'erreur sur le champ électrique DC reste de l'ordre de 5 à 10mV, donc largement supérieure au niveau des champs dynamo observés à moyenne latitude qui sont de l'ordre de 2 à 3mV au maximum en période calme. La solution pour s'affranchir de cette erreur consiste à mettre le satellite en rotation avec une période de l'ordre de quelques secondes : dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation le signal $U_1 - U_2$ est alors une sinusoïde (en supposant que le champ électrique ne varie pas de façon significative pendant une période de rotation) et le terme $(WF_1 - WF_2) = WF_{12}$ introduit simplement un décalage du niveau moyen de la sinusoïde qu'il est facile d'évaluer et qui peut donc être utilisé pour corriger les mesures. Ceci limite l'erreur à $\sim 0.2\text{mV}-0.3\text{mV}$ donc permet d'obtenir une précision raisonnable pour les champs électriques de moyenne latitude. Bien entendu une telle correction n'est pas possible pour la composante du champ électrique mesurée dans l'axe de spin où l'erreur expérimentale reste importante mais peut être corrigée en exprimant que la composante du vecteur \mathbf{E} parallèle à \mathbf{B} est nulle.

DEMETER étant stabilisé 3 axes, donc n'étant pas en rotation, on se retrouve pour toutes les composantes E_{ij} dans une configuration où il n'est pas possible de corriger facilement l'erreur due au terme WF_{ij} . Ceci n'est pas rédhibitoire lorsqu'on s'intéresse aux variations

instantanées du champ électrique ou à des champs électriques ULF quasi-périodiques comme dans le cas des évènements de type C (voir chapitre 5) dont l'amplitude de variation de quelques mV/m à ~ 10 mV/m est le paramètre intéressant. L'erreur reste critique pour l'étude des évènements caractérisés par des champs électriques relativement stables et d'amplitude modérée sur des distances (donc des intervalles de temps le long de l'orbite) assez longs ce qui est le cas des évènements de type D décrits au chapitre 6. On verra au chapitre 5 une méthode pour surmonter en partie cette difficulté.

- Polarisation des électrodes

La Figure 2.12b donne le schéma de l'électronique de mesure pour les champs électriques DC et AC. Pour les mesures en continu il est indispensable que les 2 sondes S_1 et S_2 collectent le même courant puisque la chute de potentiel dans la gaine $\delta\phi$ dépend du courant collecté. On utilise donc un générateur de courant (voir schéma) qui contrôle le courant dit « de polarisation » de la sonde et ceci implique que la résistance d'entrée R_i du préamplificateur soit beaucoup plus grande que la résistance de gaine R_g afin que le courant s'écoule uniquement à travers la gaine de la sonde et représente ainsi parfaitement le courant collecté dans le plasma. Remarquons aussi que cette inégalité $R_i \gg R_g$ satisfait la seconde condition qui apparaît sur la fonction de transfert de la sonde reliant la tension mesurée par le préamplificateur (de gain 1) U au signal existant dans le plasma e :

$$U = e \cdot \left[\frac{Z_i}{(Z_i + Z_g)} \right] \quad (2.17)$$

où Z_i est l'impédance d'entrée du préamplificateur ($R_i // C_i$) avec $R_i \sim 200 \text{ M}\Omega$ et Z_g l'impédance de la gaine entourant l'électrode dans le plasma qu'on peut assimiler, depuis le continu jusqu'aux fréquences VLF à une résistance R_g en parallèle sur une capacité C_g . La résistance R_g dépend des paramètres du plasma, principalement N_e et T_e , et du courant de polarisation de la sonde I_p . Pour ne pas perdre de sensibilité, il faut que $Z_g \ll Z_i$, en fait pour le continu et les basses fréquences, $R_g \ll R_i$, condition identique à la précédente. En l'absence d'un courant de polarisation, c'est-à-dire lorsque la sonde collecte un courant total nul (contributions ionique et électronique égales et opposées), celle-ci se porte à un potentiel ϕ_f négatif appelé « potentiel flottant » et de l'ordre de -3 à $-4 kT_e$ par rapport au potentiel plasma. La résistance de gaine R_{gf} est très élevée, de l'ordre de $150 \text{ M}\Omega$ pour $N_e \sim 10^3 \text{ el/cm}^3$, et varie sensiblement en $1/N_e$. Lorsqu'on force la sonde à collecter un courant total

électronique, la sonde se situe dans la partie électronique de la caractéristique de Langmuir (voir paragraphe 2.3) et la résistance R_g qui varie proportionnellement à $\exp(e\phi/kT_e)$ diminue lorsque le potentiel de l'électrode se rapproche du potentiel plasma. Pour obtenir des valeurs de R_g inférieures à $1\text{M}\Omega$ pour les valeurs de N_e typiques de l'orbite de DEMETER, entre $\sim 5 \cdot 10^2$ et $5 \cdot 10^4 \text{ el/cm}^3$ il faut imposer un courant de polarisation électronique suffisamment fort de l'ordre de 200 nA. La surface de la sonde est alors à un potentiel légèrement négatif et voisin du potentiel du plasma ($\delta\phi \cong -kT_e$).

CHAPITRE 3

GENERALITES SUR: L'ACTIVITÉ SOLAIRE, L'ACTIVITE MAGNÉTIQUE ET LA PHYSIQUE DE L'IONOSPHERE AUX BASSES LATITUDES

3.1- L'activité solaire et ses variations pendant la période opérationnelle de DEMETER

3.1.1- Les taches solaires, le cycle de 11 ans et le champ magnétique du Soleil

L'action du Soleil sur l'environnement de la Terre, l'ionosphère en particulier, dépend de l'intensité et du spectre de son rayonnement aux longueurs d'onde UV, EUV et X, sources principales de l'ionisation de la haute atmosphère, et aussi de la structure de son champ magnétique. Ces deux facteurs ne sont pas stables dans le temps car le Soleil est une étoile magnétiquement active dont l'état varie en suivant des cycles quasi-périodiques. On englobe sous le terme d'« activité solaire » l'ensemble des modifications qui affectent les caractéristiques observables sur le Soleil ou dans son environnement proche et qui agissent directement sur l'ionosphère en engendrant des variations périodiques de la densité et de la température du plasma et de sa composition, de façon très sensible dans la région F et l'ionosphère supérieure.

Les taches solaires constituent un marqueur de l'activité du Soleil facile à observer et dont on trouve mention en Chine plus de 800 ans avant Jésus Christ. Ce n'est qu'au 17^{ème} siècle, sous l'impulsion de Galilée (1610) et de Christoph Scheiner (1612) que débuta l'observation et l'enregistrement systématique des taches solaires. La *Figure 3.1* en donne un exemple, le schéma de droite montre qu'elles se situent au niveau de la photosphère. Ce sont des zones plus froides où la température est de l'ordre de 4500K soit environ 1500K plus faible que celle de la photosphère normale. Elles sont également le siège de champs magnétiques de petite échelle qui, le plus souvent, relie deux taches voisines et dont l'intensité peut atteindre 0,1 à 1 T, supérieure de plusieurs ordres de grandeur à l'intensité moyenne du champ magnétique à grande échelle du Soleil.

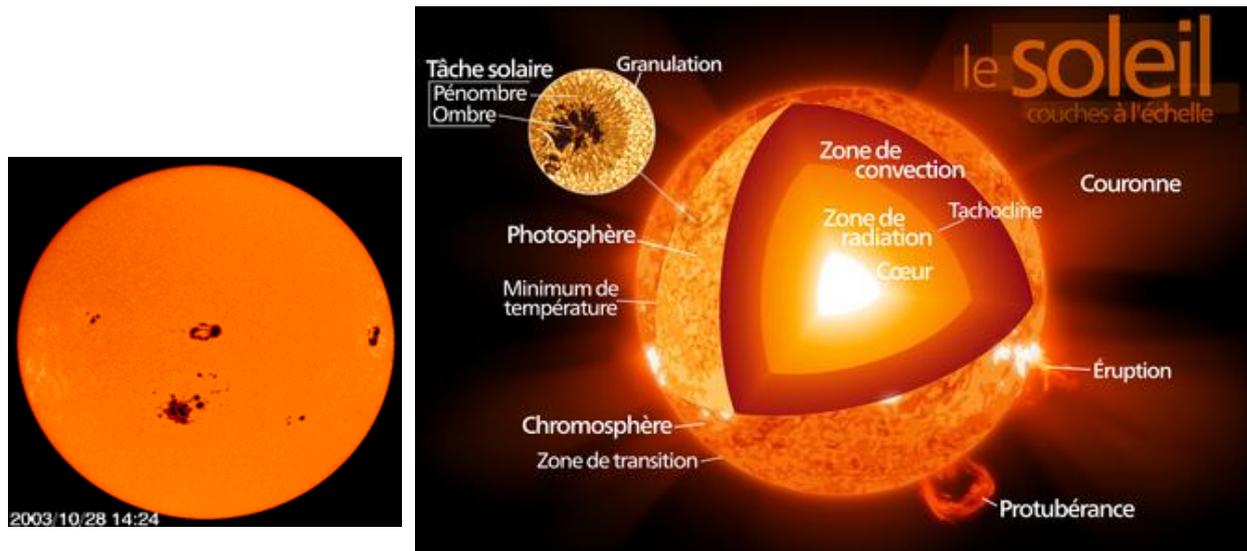


Figure 3.1. Photo de taches solaires [satellite SOHO] et structure interne du Soleil.

En 1843 Heinrich Schwabe découvrit que les taches suivaient un cycle d'environ 11 ans, qui régit à la fois leur nombre et leur position à la surface du Soleil. Elles sont les plus nombreuses dans les années de maximum d'activité qui coïncide aussi avec un maximum de l'intensité du rayonnement UV, EUV. Leur déplacement à la surface du Soleil au cours d'un cycle est représenté sur la Figure 3.2. Les taches se forment aux latitudes moyennes et migrent vers l'équateur solaire au cours d'un cycle d'où le diagramme 'papillon' qui apparaît sur cette figure 3.2.

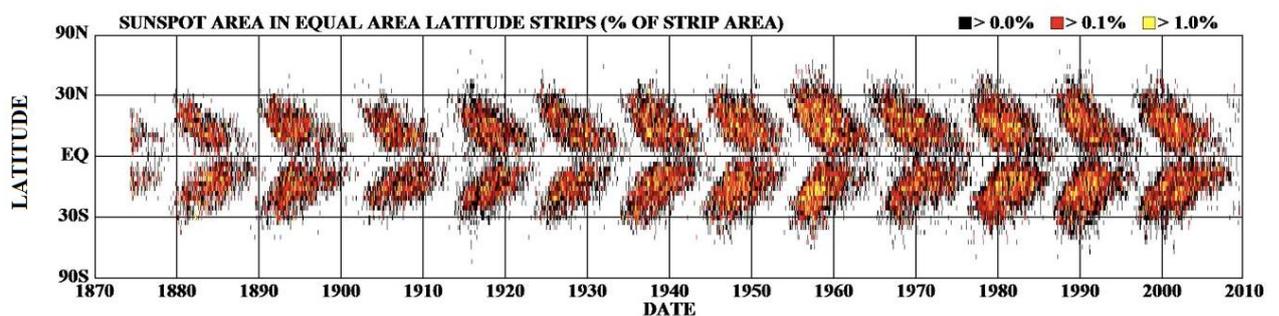


Figure 3.2. Cycle des taches solaires: diagramme papillon (site de la Nasa); sur l'axe des ordonnées il y a la latitude, sur l'axe des abscisses les années

De nombreux indices existent pour caractériser le niveau d'activité du Soleil mais 2 indices solaires sont principalement utiles lorsqu'on s'intéresse à l'ionosphère :

- 1) Le nombre de taches solaires observées sur le disque solaire, mesuré depuis le 17^{ième} siècle ; en anglais « Solar Sunspot Number » (SSN).

- 2) Le Flux solaire à 10.7 cm correspondant à l'émission des ondes radioélectriques à 2800 MHz au niveau de la haute chromosphère et de la basse couronne, très bien corrélé au SSN ainsi qu'au rayonnement UV. Il est mesuré depuis 1947.

La *Figure 3.3* montre la très bonne concordance des 2 indices pour traduire les variations cycliques de l'activité solaire et son évolution d'un cycle à l'autre et sur de très longues périodes.

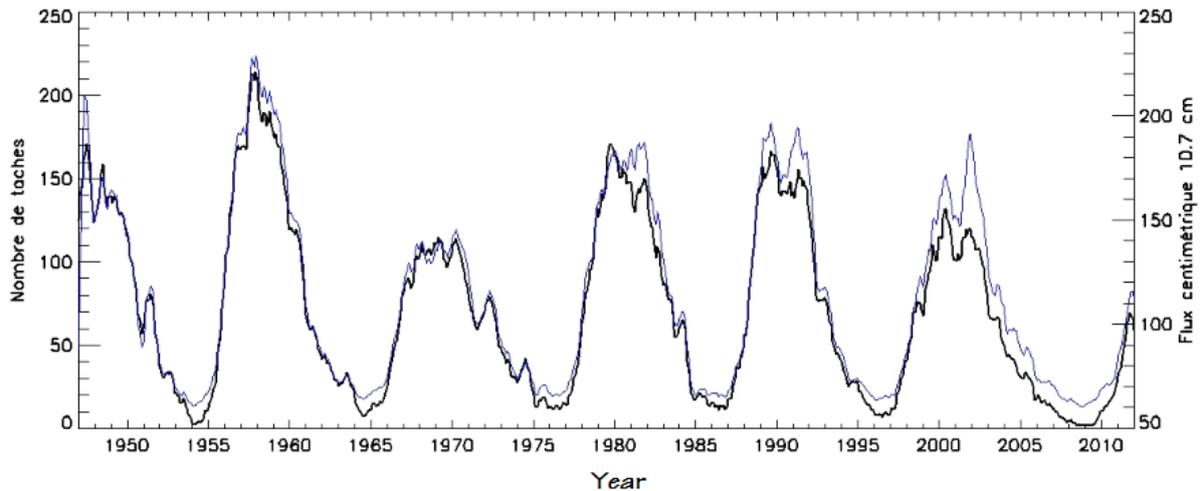


Figure 3.3. Variation de F10.7 (station de Penticton/USA) et de SSN (observatoire de Bruxelles) de 1947 à 2012. Figure tirée du site de l'observatoire de Meudon

Au maximum de chaque cycle, le nombre de taches est important, le flux F10.7 est grand et le rayonnement UV plus intense : dans l'ionosphère la densité et la température électroniques sont fortes. La *Figure 4.13* montre que lors de la période de fonctionnement du satellite DEMETER [2005-2010], l'activité solaire est passée par un minimum très prononcé en 2008-2009, le plus faible depuis une centaine d'années mais comparable à ceux observés en 1876-1877 et en 1900-1901.

La preuve de l'existence d'un champ magnétique solaire date de 1908 et est due à Georg Hale. Pour mettre en évidence sans ambiguïté l'existence de ce champ il utilisa l'observation du découplage et des polarisations des raies d'émission par effet Zeeman.

Le champ magnétique à grande échelle engendrée par la dynamo solaire est le champ « poloïdal » qui, comme celui des planètes magnétisées telle la Terre, a une composante principale dipolaire. Il varie avec une période de 22 ans, 2 cycles solaires, et se renverse environ tous les 11 ans en étant anti-corrélé au cycle des taches. Son intensité au voisinage de la surface du Soleil est d'environ 10 Gauss.

Dans la région où apparaissent les taches solaires la rotation de matière solaire n'est pas constante en latitude mais sujette à une rotation différentielle, dont la vitesse augmente entre le pôle et l'équateur. Les mécanismes qui sont à la base de ce phénomène ont pour conséquence l'apparition de structures convectives et de boucles de courants localisées qui déforment totalement le champ poloïdal. Leur conséquence est l'apparition d'un champ magnétique « toroïdal », responsable des structures à petite échelle au niveau des taches avec de très grandes intensités, de l'ordre de quelques kGauss. Ces champs magnétiques sont fermés, à la différence du champ poloïdal global qui est ouvert en raison parce qu'il est entraîné par le plasma qui s'échappe en permanence du Soleil. Sur la *Figure 3.4* on a représenté l'évolution des champs magnétiques solaires au cours d'un cycle complet. Le panneau du haut représente les 2 composantes, la composante toroïdale (taches -> diagramme papillon), et la composante poloïdale qui apparaît sur les bords extérieurs de la figure sous la forme d'une alternance de différentes polarités (jaune pour la polarité positive et bleue pour la polarité négative). Les 2 courbes du bas représentent la variation du champ poloïdal et du champ magnétique toroïdal en fonction de l'année.

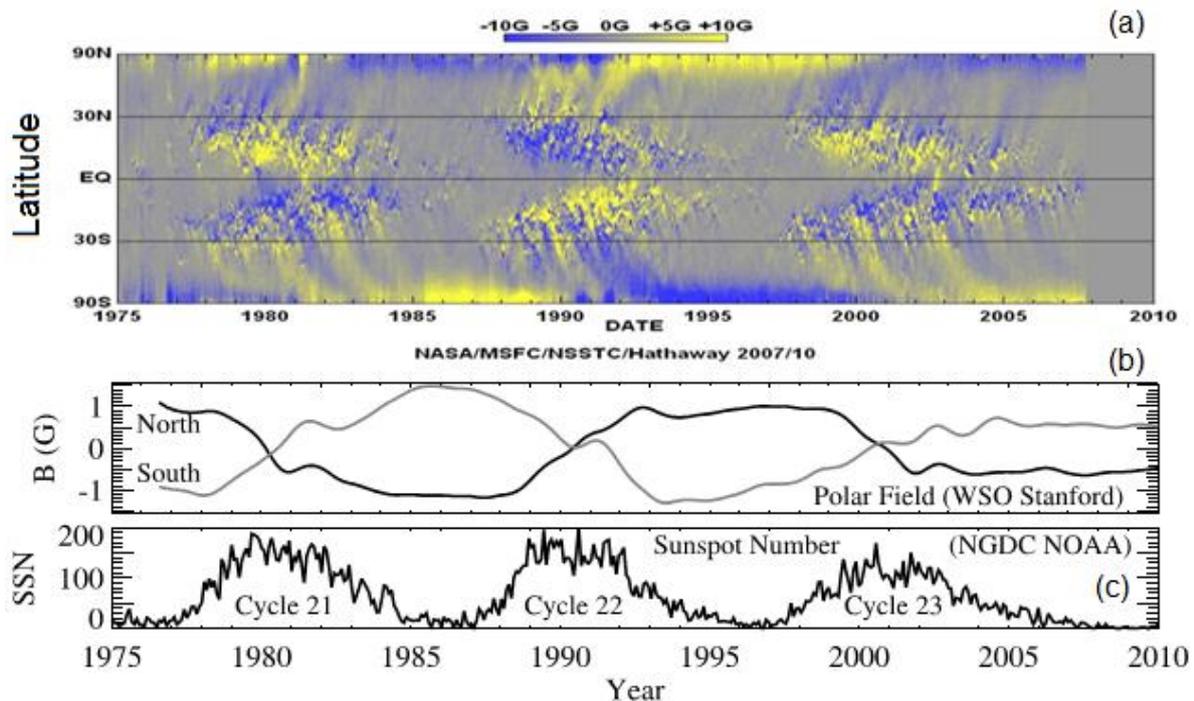


Figure 3.4. Cycle solaire complet (Li et al, 2011) en couleur la figure combine les champs toroïdal et poloïdal; B(G): Champ magnétique dipolaire ou champ poloïdal exprimé en Gauss en fonction du temps exprimé en année; SSN ou champ toroïdal.

3.1.2- Rayonnement solaire et vent solaire

La Figure 3.5 présente schématiquement le spectre du soleil depuis le rayonnement γ jusqu'aux ondes radioélectriques, en passant par le rayonnement X, l'ultra-violet, le visible, l'infra-rouge. Le rayonnement UV est celui qui, avec le rayonnement X dans une moindre mesure, contrôle la formation de l'ionosphère. Il est lié au cycle de taches solaires et, dans les années de maximum d'activité solaire, le soleil émet un rayonnement UV environ 10 fois plus intense que pendant les minima.

Le vent solaire est un flux de particules chargées qui s'échappent en permanence de la haute atmosphère solaire. Il est constitué à 95% de protons H^+ , ~ 4% de noyaux d'hélium doublement ionisés He^{++} et de ~ 1% d'ions d'éléments plus lourds, principalement l'Oxygène ou le Carbone avec de forts degrés d'ionisation (4 à 6), les autres éléments plus lourds constitutifs de la matière solaire étant à l'état de traces. Le champ magnétique à grande échelle du Soleil est transporté par le vent solaire jusqu'aux confins du Système Solaire : c'est le champ magnétique interplanétaire, dont l'intensité est de l'ordre de 1 à quelques dizaines de nano teslas.

En l'absence d'évènement solaire (CME), la vitesse du vent solaire régulier est environ de 350 à 400 km/s. La magnétosphère, joue le rôle d'écran en détournant en grande partie le vent solaire qui s'écoule le long des flancs de la magnétosphère. Seule une petite partie des ions et des électrons du vent solaire ont accès à l'intérieur de la magnétosphère et, pour finir, à l'ionosphère, en pénétrant au niveau des cornets polaires.

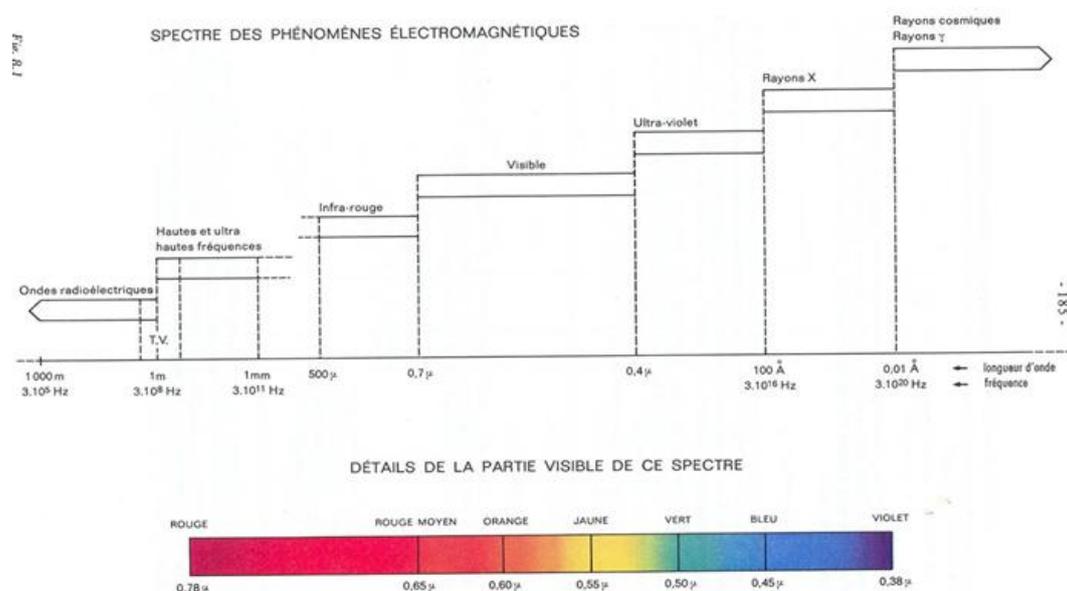


Figure 3.5. Spectre des émissions électromagnétiques du Soleil. (Triplet et Roche, Météorologie générale)

3.1.3- Les grandes perturbations solaires

Eruptions solaires

Les éruptions solaires (Solar Flare) correspondent à l'accélération de particules de très fortes énergies piégées dans les structures en boucle du champ toroïdal au niveau des paires de taches actives (*Figure 3.6*). Ces événements engendrent des émissions brutales et intenses de rayons X et γ . L'ionisation des basses couches de l'ionosphère, principalement la couche E, sous l'effet de ce rayonnement entraîne une perturbation significative des courants électriques qui circulent dans la région dynamo de l'ionosphère observable, au sol, par la perturbation spécifique correspondante du champ magnétique terrestre, le « crochet magnétique ».

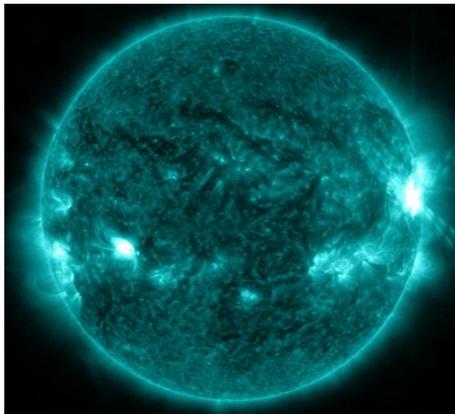


Figure 3.6. Eruption de classe X1.0, Oct. 27, 2013 (image of NASA's Solar Dynamics Observatory, Credit: NASA/SDO)

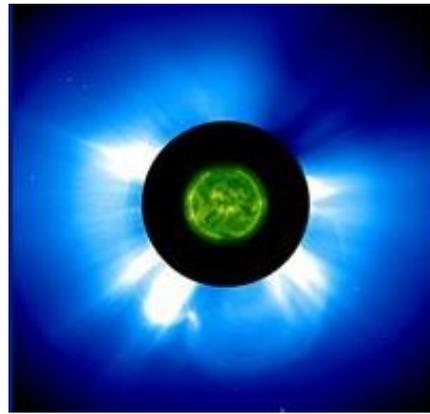


Figure 3.7. Photo montage de l'éjection de masse coronale observée par les instruments de SOHO (Crédits : ESA/NASA)

Ejections de matière coronale (CME)

Les CMEs, en général consécutives à une Eruption Solaire, correspondent à une rupture d'une boucle magnétique du champ toroïdal dont la conséquence est l'éjection d'un plasma dense et chaud de la couronne solaire dans l'espace interplanétaire. Les éjections de masse coronale peuvent ainsi expulser dans l'espace interplanétaire une quantité de matière solaire de l'ordre de 10^9 tonnes (*Figure 3.7*).

Ce nuage de plasma se propage dans le milieu interplanétaire plus rapidement que le vent solaire moyen, à des vitesses comprises, suivant les événements, entre 400 km/s et plus de 1000 km/s. Au niveau de la Terre, son impact provoque une compression rapide de la

magnétosphère : le point sub-solaire peut passer d'une distance par rapport à la Terre de l'ordre de 10-12 rayons terrestres (RT) à 5-6 RT. Cette perturbation et l'augmentation brutale de la reconnexion des champs magnétiques interplanétaire et terrestre génèrent l'instabilité majeure de la magnétosphère que constituent les orages magnétiques dont la durée est de l'ordre de 2 à 3 jours. L'ionosphère subit des variations de grande amplitude, y compris à moyenne et basse latitudes, pendant toute la durée de l'orage. Le nombre de CME varie avec le cycle des taches solaires, passe par un maximum de l'ordre de 2 à 4 par an au niveau du maximum d'activité solaire et au début de sa phase de décroissance. Durant la période opérationnelle de DEMETER plusieurs orages magnétiques ont été observés, notamment en Novembre 2004, en 2005 et en Avril 2010.

Vents solaires rapides émis par les trous coronaux

La vitesse du vent solaire mesurée par les satellites interplanétaires montre des variations importantes en l'absence d'éjections de masse coronale. On a pu associer ces variations qui montrent une périodicité associée à la rotation du Soleil, à l'existence de « trous coronaux » et à la structure de la composante poloidale du champ magnétique solaire. Les trous coronaux apparaissent, comme des zones sombres, principalement à haute latitude et au voisinage des pôles du Soleil. La *Figure 3.8* présente une image d'un trou coronal et la *Figure 3.9* montre la structure correspondante des lignes de force du champ magnétique interplanétaire qui correspond à la présence de ces vents rapides.

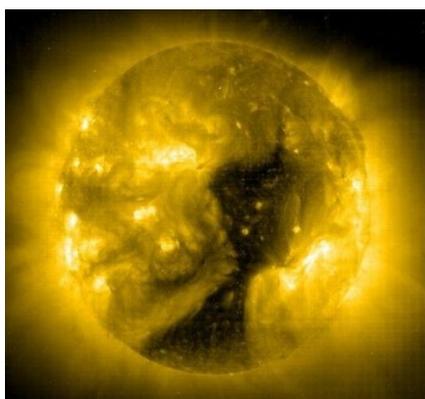


Figure 3.8. Trou coronal observé par le satellite SOHO

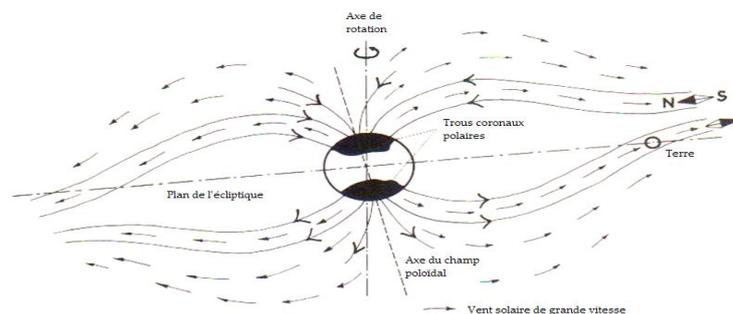


Figure 3.9. Jet de vent rapide émis depuis un trou coronal (Legrand, 1984)

La vitesse des vents solaires rapides varient de 450 km/s à 800 km/s, ou plus. Ces vents rapides sont à l'origine de l'activité magnétique récurrente. Ils peuvent déclencher des orages magnétiques, surtout lorsque le champ magnétique interplanétaire qu'ils transportent est dirigé vers le sud. Les vents rapides sont plus observés durant la phase décroissante et le minimum du cycle de taches solaires. Au cours de la période de fonctionnement de DEMETER, des vents rapides ont été observés au cours des années 2005 à 2008.

3.2- L'activité magnétique et ses variations pendant la période opérationnelle de DEMETER

3.2.1- Généralités sur le champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre est connu depuis plus de 2 millénaires. C'est au début du 17ème siècle que dans son ouvrage « de Magnet », Gilbert (1600) a introduit l'idée qu'il y avait un aimant au centre de la Terre, afin d'expliquer les variations du champ magnétique détectées par les navigateurs au moyen de leurs boussoles. La *Figure 3.10* est un dessin extrait du livre de Gilbert et la *Figure 3.11* donne un schéma de l'intérieur de la Terre à partir duquel on explique aujourd'hui la dynamo terrestre.

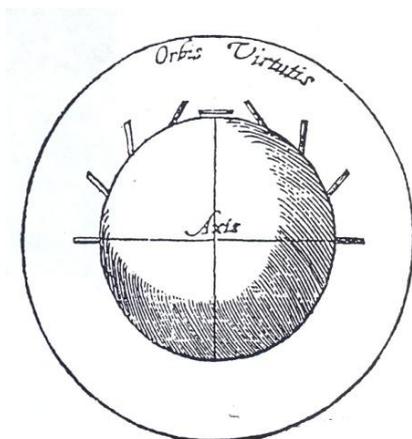
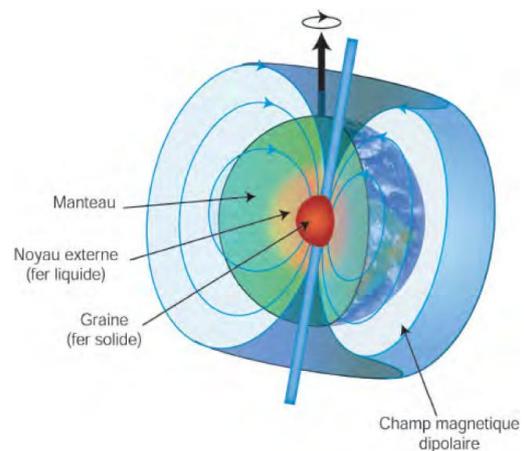


Figure 3.10. Le champ magnétique de la terre, d'après Gilbert (1600), conception du 17eme siècle



*Figure 3.11. Le champ magnétique terrestre
Conception actuelle*

Le champ magnétique de la Terre est en premier lieu généré à l'intérieur de la Terre, par l'effet de dynamo due aux mouvements de convection dans le noyau terrestre, composé à 90% de fer liquide. Ces mouvements sont la conséquence du refroidissement progressif du noyau et de la graine solide située au centre de la Terre (voir le site de l'IPGP).

Le champ magnétique mesuré à la surface de la Terre a plusieurs origines :

- 1- Le champ principal engendré par la dynamo terrestre, dont la composante majeure est dipolaire;
- 2- Le champ superficiel causé par l'aimantation des roches de la croûte;
- 3- Le champ d'origine externe créé par les courants électriques variables qui circulent dans l'ionosphère et la magnétosphère ;
- 4- Le champ induit créé dans le sol conducteur par les perturbations magnétiques dues aux courants externes.

Le champ principal varie à l'échelle séculaire et le champ superficiel est quasi constant.

Les variations transitoires du champ magnétique terrestre (composantes 3 et 4) sont donc essentiellement dues aux courants électriques externes qui circulent dans l'ionosphère et la magnétosphère.

C'est Graham, en 1722, qui a mis en évidence la variation régulière diurne du champ magnétique terrestre, et c'est Humbolt, en 1808, qui a le premier défini l'orage magnétique, la perturbation transitoire la plus spectaculaire.

3.2.2- Les Indices Magnétiques

La complexité des variations du champ magnétique terrestre a conduit à la définition d'indices magnétiques permettant d'appréhender simplement et de façon quantitative une réalité complexe. Les indices magnétiques fournissent ainsi une « mesure » de l'activité magnétique. La variation régulière diurne du champ magnétique terrestre, nommée S_R par *Mayaud* (1965), sert de base à la confection des indices.

L'indice K

La *Figure 3.12* extraite de l'ouvrage de *Mayaud* (1980) permet de comprendre comment est établi l'index K qui va servir à construire d'autres indices magnétiques.

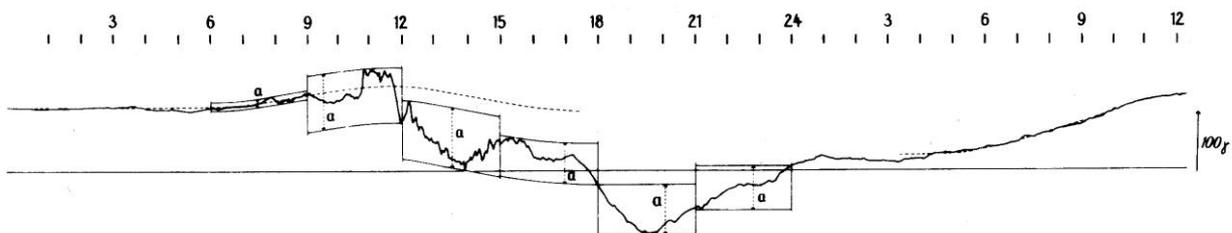


Figure 3.12. Variations de la composante horizontale H observée à l'observatoire de Guam

Dans un intervalle de 3 heures, après avoir tracé le S_R , en trait pointillé sur la figure, on détermine l'écart maximum noté 'a' sur la figure. Cet écart 'a' est exprimé en nanoTesla (nT). On convertit ensuite cet écart en une valeur comprise entre 0 et 9. La table de conversion dépend de la station magnétique. L'indice K peut être aussi bien exprimé en nT ou en un nombre compris entre 0 et 9 et sa définition officielle est la suivante :

«Un indice K est un entier compris entre 0 et 9 correspondant à des classes d'activité contenant un large ensemble de perturbations magnétiques durant un intervalle de 3 heures. La limite des classes d'activité magnétique est définie pour chaque observatoire afin que la détermination de l'activité géomagnétique ne dépende pas de façon significative de la situation géographique de l'observatoire comme ceci pourrait être le cas pour les zones sub-aurorales. Aux moyennes et basses latitudes les intervalles successifs de 3h UT (0-3 h, 3-6 h, ..., 21-24 h UT) permettent d'obtenir 8 indices K pour un jour donné. Les indices K sont définis manuellement à partir des magnétogrammes par les observateurs ayant l'expérience requise ou par un calculateur utilisant un des 4 algorithmes approuvés par le IAGA» (d'après *Menvielle et al., 2008*).

Les indices Am/Kpm et Ap/Kp

A partir de cet indice K, déterminé dans les différentes stations magnétiques, on définit les indices Am/Kpm et Ap/Kp, en faisant la moyenne des indices K obtenus dans les observatoires sélectionnés.

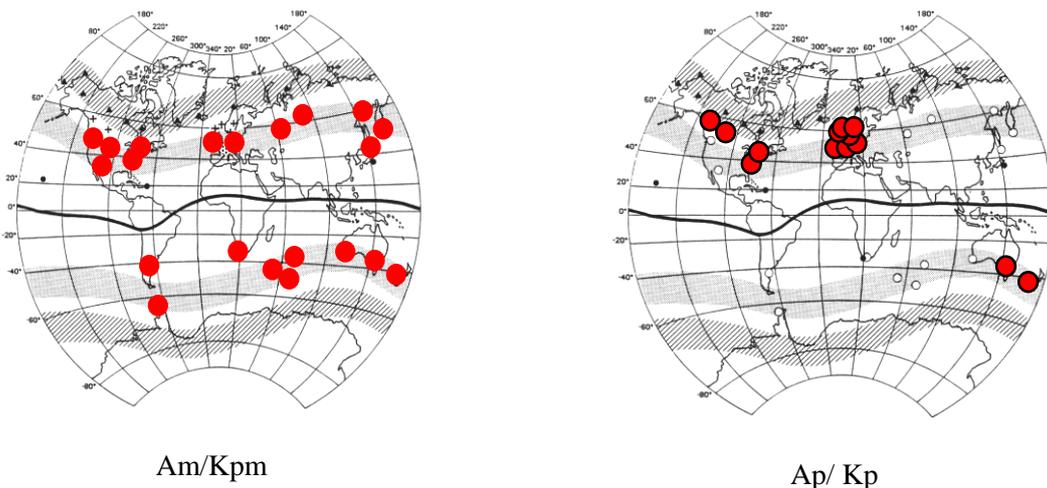


Figure 3.13. Distribution des observatoires magnétiques sélectionnés

La *Figure 3.13* présente les observatoires utilisés pour définir l'indice Am/Km (gauche), et ceux utilisés pour l'indice Ap/Kp (droite). L'indice Ap/Kp est disponible depuis 1932 et

l'indice Am/Kpm depuis 1959. Les indices Ap et Kp mesurent le même phénomène dans des unités différentes, Ap étant exprimé en nT et Kp dans une échelle de 0 à 9 ; de même pour Am et Kpm.

La Figure 3.14 présente les tables des indices, telles que l'on peut les trouver sur le site ISGI : (International Service of Geomagnetic Indices): <http://isgi.unistra.fr>.

October 2010

Date	Q.D.		am_3h_ind								Am	Kpm_3h_ind							
01/10	C	C	4	5	0	1	1	2	1	2	2	0+	1-	0o	0o	0o	0o	0o	0o
02/10	C	C	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0o	0o	0o	0o	0o	0o	0o	0o
03/10	C	C	4	5	0	5	1	1	2	1	2	0+	1-	0o	1-	0o	0o	0o	
04/10	C	C	0	0	3	0	6	4	5	8	3	0o	0o	0o	0o	1-	0+	1-	1+
05/10	C	C	9	11	24	15	8	12	6	4	11	1+	2o	3o	2+	1+	2o	1-	0+
06/10	C	C	6	0	13	12	25	10	10	4	10	1-	0o	2o	2o	3o	2-	2-	0+
07/10	C	C	6	6	7	9	11	3	0	9	6	1-	1-	1o	1+	2o	0o	0o	1+
08/10	C	C	20	8	4	9	1	7	2	7	7	3-	1+	0+	1+	0o	1o	0o	1o
09/10	C	C	10	4	7	11	3	10	5	4	6	2-	0+	1o	2o	0o	2-	1-	0+
10/10	C	K	2	2	1	6	8	8	7	14	6	0o	0o	0o	1-	1+	1+	1o	2+

Figure 3.14. Extrait de table des indices Am et Kpm

Nous voyons sur la Figure 3.14 que le 2 octobre 2010 est un jour pour lequel l'indice, Km, vaut 0 toute la journée, cela signifie que la variation observée le 2 octobre est la variation régulière du champ magnétique terrestre (S_R).

L'indice magnétique Am/Km permet d'évaluer l'activité magnétique moyenne planétaire. Dans notre étude, nous utiliserons l'indice Am/Km qui permet d'après *Mayaud* (1980) de reconnaître 5 classes principales de niveau d'activité magnétique :

- Am journalier < 13nT => jour magnétiquement très calme avec aucun Km > 2+
- Am journalier < 20 nT => jour magnétiquement calme avec aucun Km > 2+
- 20 nT < Am journalier < 40 nT => jour moyennement perturbé
- 40 nT < Am journalier < 60 nT => jour perturbé
- Am journalier > 60nT => jour très perturbé

Lorsqu'il y a un orage magnétique, Kpm tri-horaire a des valeurs supérieures à 5 qui peuvent atteindre parfois la valeur de 9. Sur la Figure 3.15, nous voyons que la valeur d'Am journalier est supérieure à 64 le 5 avril 2010 et que Kpm horaire atteint la valeur maximale de 7.

La Figure 3.16 (*Shimeis et al., 2012*) présente les variations des paramètres du vent solaire (V_x et B_z IMF), et les variations de deux autres indices magnétiques qui permettent de qualifier les courants qui circulent dans la magnétosphère (Dst) et dans l'ionosphère aurorale

(AU, AL), lors des orages magnétiques. Nous n'utiliserons pas ces deux indices dans notre étude. Très brièvement, l'indice Dst est obtenu à partir de l'indice K de 4 observatoires situés aux basses latitudes. Les indices AU et AL sont obtenus en utilisant les composantes H du champ magnétique (et pas l'indice K) de 13 observatoires répartis en zone aurorale.

Avril 2010

Date	Q.D.		am 3h ind							Am	Kpm 3h ind								
01.04			31	26	18	11	44	17	10	23	22	3+	3o	3-	2o	4o	2+	2-	3o
02.04			22	17	42	35	19	19	26	17	24	3-	2+	4o	4-	3-	3-	3o	2+
03.04			21	7	10	6	15	29	21	20	16	3-	1o	2-	1-	2+	3+	3-	3-
04.04			25	22	31	9	20	15	31	54	25	3o	3-	3+	1+	3-	2+	3+	4+
05.04			22	27	60	164	83	66	50	42	64	3-	3+	5-	7-	5+	5-	4+	4o
06.04			64	63	53	62	55	78	62	48	60	5-	5-	4+	5-	4+	5o	5-	4+
07.04			52	17	60	49	34	31	34	32	38	4+	2+	5-	4+	4-	3+	4-	3+
08.04			53	15	15	21	14	5	11	35	21	4+	2+	2+	3-	2+	1-	2o	4-
09.04	C	C	24	13	7	8	12	7	11	5	10	3o	2o	1o	1+	2o	1o	2o	1-
10.04	C	C	14	10	4	2	6	2	3	6	5	2+	2-	0+	0o	1-	0o	0o	1-

Figure 3.15. Valeurs des indices Am/Kpm pour l'orage du 5 Avril 2010.

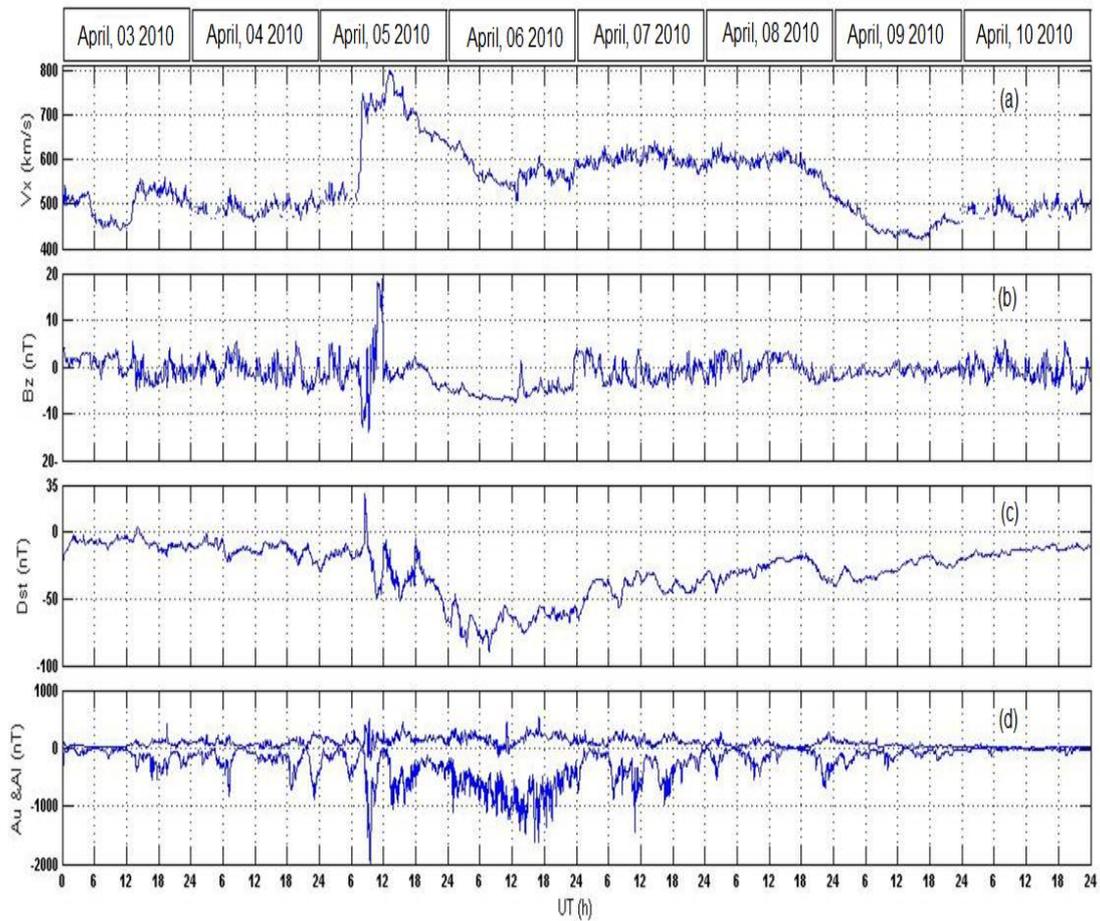


Figure 3.16. Exemple des variations de la vitesse du vent solaire (V_x), du champ magnétique interplanétaire (B_z) et des indices Dst, AU et AL lors d'un orage magnétique pendant la période du 3 au 10 Avril 2010

Cette figure montre que lors de l'arrivée d'une éjection de masse coronale le 5 avril vers 08.26 UT, le Dst s'accroît fortement, c'est la phase de compression de la magnétosphère sous la pression du CME. Ensuite le Dst décroît durant la phase principale de l'orage puis revient à son état initial durant la phase de recouvrement qui peut durer plusieurs jours. Dans le chapitre 5 sur les événements de type C, nous présenterons des résultats pour cet événement. Les indices AU et AL réagissent aussi et s'intensifient au cours des différentes phases (compression, principale ou de recouvrement).

L'indice Aa /Kpa

Cet indice est obtenu en faisant la moyenne des indices K de 2 stations antipodales (*Mayaud, 1971; 1973*). Cet indice existe depuis 1868 et permet de caractériser les variations à long terme de l'activité solaire et géomagnétique (*Legrand et Simon, 1989*).

La *Figure 3.17* de *Zerbo et al. (2012)* présente les variations de l'indice Aa annuel, de 1868 à 2010. Cette figure montre très clairement que l'indice Aa a augmenté au cours du siècle dernier et atteint un maximum au cours de l'année 2003. Il a ensuite diminué pour atteindre une valeur minimale de 8nT en 2009. C'est la valeur la plus petite enregistrée pour l'indice Aa.

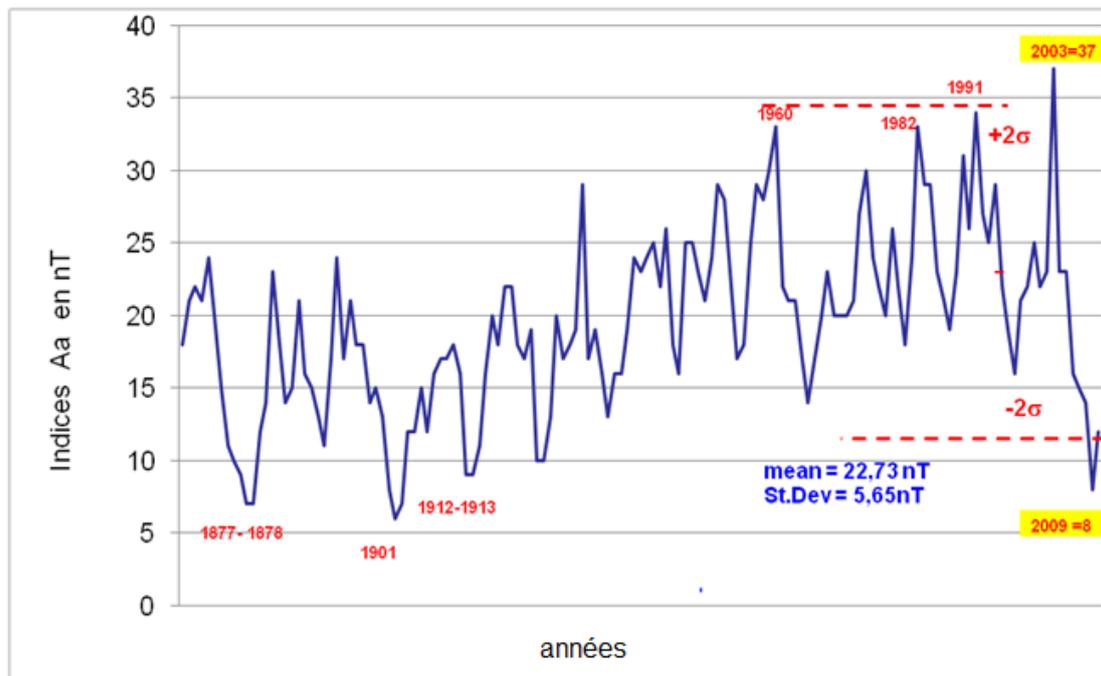


Figure 3.17. Variation des indices Aa de 1868 à 2010

Le satellite DEMETER a fonctionné de 2005 à 2010, durant le long minimum d'activité solaire de 2006 à 2009 avec le plus faible minimum d'activité solaire et plus faible niveau d'activité magnétique enregistré depuis 100 ans.

3.3- Atmosphère et ionosphère

Le soleil rayonne sur l'environnement terrestre, il dissocie et ionise les espèces chimiques et altère ainsi la composition de la haute atmosphère. Dans l'ionosphère, composante de la haute atmosphère neutre ionisée par le rayonnement solaire, les mécanismes chimiques, les propriétés électriques, les mouvements d'ensemble et les transferts d'énergie sont intimement liés à l'activité solaire et les propriétés du plasma en reflètent les variations. Les processus qui régissent l'évolution et la dynamique du plasma ionosphérique résultent à la fois des variations diurne, saisonnière et multi-annuelle du rayonnement solaire, principalement dans la partie UV et EUV du spectre, mais dépendent aussi du couplage entre le vent solaire et l'environnement lointain terrestre, la magnétosphère. Les phénomènes associés à l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère se répercutent par la suite dans l'ensemble de l'environnement terrestre, et, à terme, sur l'ionosphère et la haute atmosphère neutre. Plusieurs ouvrages traitent de l'environnement lointain de la Terre en liaison avec la thématique récente de météorologie de l'espace, voir par exemple *Lilensten et Blelly* (2000).

3.3.1- L'atmosphère

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse qui entoure la terre solide avec une densité qui reste significative jusqu'à une altitude de plusieurs centaines de kilomètres. On peut distinguer les différentes régions de l'atmosphère neutre à partir du profil en altitude de la température de ses constituants. Globalement la température des gaz atmosphériques varie de $\sim 200\text{K}$ à 1500K environ. La *Figure 3.18* présente le profil de la température en fonction l'altitude.

En partant du sol, la première couche est la troposphère qui s'étend de 0 à 12 km environ aux moyennes latitudes et qu'on nomme souvent l'atmosphère météorologique puisque c'est principalement dans cette région que se concentrent les processus qui gouvernent notre météorologie quotidienne. Dans la troposphère le gradient de température est négatif et la température du gaz neutre atteint ainsi un minimum compris entre 190 et 210K à la tropopause qui marque la transition entre la troposphère et la stratosphère. La tropopause se situe à une altitude qui s'élève de 6-8 km vers le pôle jusqu'à plus de 16 km à l'équateur où la température est la plus basse. Son altitude est de l'ordre de 11 à 12 km aux latitudes

moyennes. La tropopause marque le début de la seconde grande région de l'atmosphère neutre, la stratosphère, qui s'étend jusqu'à une altitude de 45 km environ, et est caractérisée par un gradient positif de température.

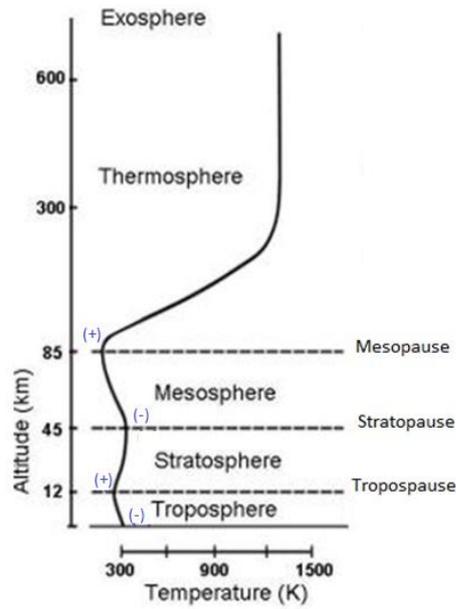


Figure 3.18. Profil de la température de l'atmosphère avec la définition des couches de l'atmosphère.

Au-dessus de la stratosphère on trouve la mésosphère, de 45 à 90 km environ où le gradient de température s'inverse de nouveau et devient négatif, la température passant ainsi vers 85-90 km par le second minimum après celui de la tropopause, avec une valeur de l'ordre de 150K-170K. Au-delà de cette altitude on entre dans la thermosphère, où la température du gaz neutre augmente rapidement jusqu'à une température limite atteinte vers 300 km d'altitude. Cette température dépend de l'activité solaire, augmentant de 1000K, voire moins lors de minima d'activité solaire très prononcés comme celui de 2008-2009, à des valeurs de l'ordre de 1500K pour les maxima d'activité solaire. Dans la thermosphère la densité du gaz neutre diminue avec une échelle de hauteur qui augmente progressivement avec l'altitude pour atteindre ~ 50 km au niveau de l'exobase qui marque le début de la dernière région de la haute atmosphère, l'exosphère. Dans cette région les libres parcours moyen des constituants neutres deviennent supérieurs à l'échelle de hauteur et on peut dire que les atomes et les molécules se déplacent pratiquement sur des trajectoires balistiques.

3.3.2- L'ionosphère

L'ionosphère est la partie de la haute atmosphère terrestre où une partie des molécules et des atomes neutres sont ionisés. Elle s'étend depuis environ 50km jusqu'à une limite supérieure de quelques milliers de kilomètres qu'il est impossible de définir avec précision puisque, à haute altitude, le plasma ionosphérique se couple avec le plasma magnétosphérique sans discontinuité. L'ionosphère est caractérisée par un profil vertical typique de la densité électronique indiqué sur la *Figure 3.19*. Le maximum de la densité dans la région F se situe dans la thermosphère à une altitude de l'ordre de 300 km.

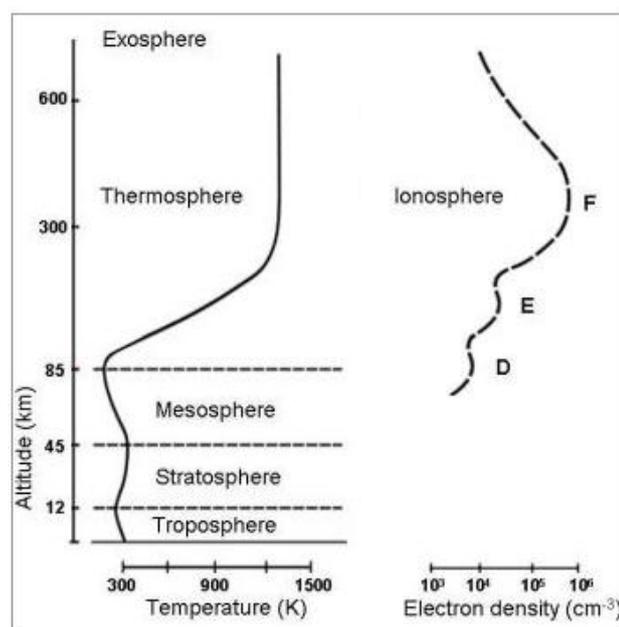


Figure 3.19. Profils de la densité électronique de l'ionosphère-de jour- et de la température de l'atmosphère.

La source principale d'ionisation qui donne naissance au plasma ionosphérique est le rayonnement solaire, principalement dans les longueurs d'onde UV et EUV et X, dont l'interaction avec les atomes ou molécules neutres produit des ions positifs et des électrons. A moyenne et basse latitudes, les particules de grande énergie du rayonnement cosmique constituent une source secondaire d'ionisation, avec une efficacité significative uniquement dans la région D de l'ionosphère au niveau de la mésosphère. On peut également mentionner pour leur rôle dans l'ionosphère inférieure nocturne les traces d'ionisation que créent les poussières météoritiques au voisinage de la mésopause. A haute latitude, les particules aurorales et celles qui précipitent dans le cornet polaire et la calotte polaire constituent une

source importante d'ionisation qui devient majeure en hiver. En raison de leur flux plus important que celui des protons, il s'agit principalement d'électrons dont les énergies sont typiquement comprises entre ~ 100 eV et 100 keV. La *Figure 3.20* présente les profils en altitude des densités électronique et ioniques. On voit que les densités des atomes et des molécules de l'atmosphère neutre varient de $\sim 10^{12}$ cm^{-3} vers 100 km à 10^6 cm^{-3} au niveau de l'exobase sont largement supérieures aux densités des ions (10^2 cm^{-3} à 10^6 cm^{-3}) jusqu'à ce qu'on atteigne l'exosphère. Le plasma de l'ionosphère est neutre électriquement car toute charge d'espace est immédiatement annihilée par la grande conductivité du milieu le long du champ magnétique. La densité électronique est donc la somme des densités de tous les ions. Dans l'ionosphère inférieure, régions E et bas de la région F, jusque vers 180 km d'altitude, les espèces majoritaires sont les ions moléculaires, NO^+ , le plus abondant, O_2^+ et N_2^+ , l'oxygène atomique O^+ devenant important à partir de 180 km. Aux altitudes supérieures, les 3 ions majoritaires sont les ions atomiques O^+ et les ions légers H^+ et He^+ , l'ion H^+ devenant de façon générale largement majoritaire au-delà de 1500 à 2000 km et dans la magnétosphère.

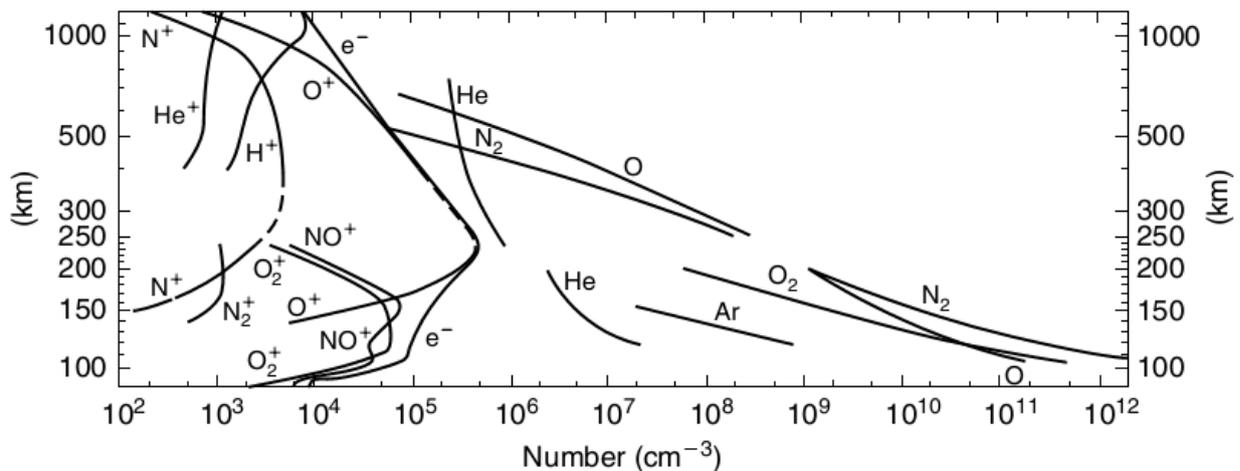
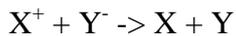


Figure 3.20. Concentration des différents ions, atomes et molécules dans l'ionosphère en fonction de l'altitude (d'après Rishbeth and Garriott, 1969).

La photo-ionisation qui crée les ions et les électrons est contrebalancée par des mécanismes de perte qui les font disparaître et aboutissent donc à un équilibre de la densité du plasma qui varie relativement lentement au cours de la journée en fonction de l'élévation solaire donc de l'intensité du rayonnement ionisant solaire. Les électrons et les ions disparaissent essentiellement par attachement et recombinaison. Dans la partie basse de l'ionosphère, la perte d'électrons se fait en partie par "attachement", processus par lequel les

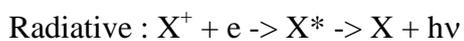
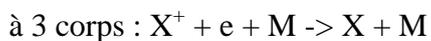
électrons s'attachent à des atomes neutres pour former des ions négatifs. Ce processus est significatif essentiellement de nuit dans la région D car, de jour, les mécanismes de photo-détachement empêchent l'existence d'une densité significative d'ions négatifs sauf, éventuellement, au bas de la région D. Dans la partie haute de l'ionosphère, la recombinaison est la principale cause de perte d'électrons. Les principales réactions photochimiques qui contrôlent la densité des ions et électrons ionosphériques sont données ci-dessous:

a) recombinaison ion-ion

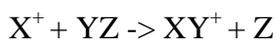


b) recombinaison ion -électron

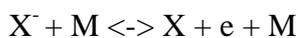
Réaction :



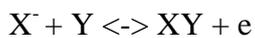
c) interchange ion-atome ou molécule



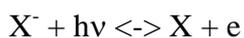
d) Détachement collisionne



e) Détachement associatif



f) Photo détachement



Les astérisques signalent que les atomes ou molécules peuvent être dans des états excités. Une particule neutre M peut échanger énergie et impulsion, mais ne prend pas part à la réaction chimique.

3.4- Modèle simplifié de l'ionosphère: le modèle de Chapman

En 1931, Sidney Chapman a proposé une théorie simplifiée pour décrire le mécanisme de la formation des couches ionisées. La *Figure 3.21* donne la courbe du taux de production de l'ionisation en fonction de l'altitude qui dépend de 2 facteurs, l'intensité du rayonnement solaire et la densité du gaz à ioniser.

Facteur 1 : le rayonnement solaire.

L'intensité du rayonnement solaire augmente en fonction de l'altitude, car le rayonnement UV et EUV et les rayons X sont progressivement absorbés en traversant l'atmosphère, seul le rayonnement dans le domaine visible et infra-rouge arrivant au sol.

Facteur 2 : la matière à ioniser

La matière à ioniser diminue en fonction de l'altitude parce que les concentrations des atomes et molécules diminuent avec l'altitude.

La combinaison de ces deux facteurs fait qu'il existe un maximum à une altitude qui se situe au niveau où l'intensité du rayonnement ionisant est réduite d'un facteur 1/e de son intensité au sommet de l'atmosphère.

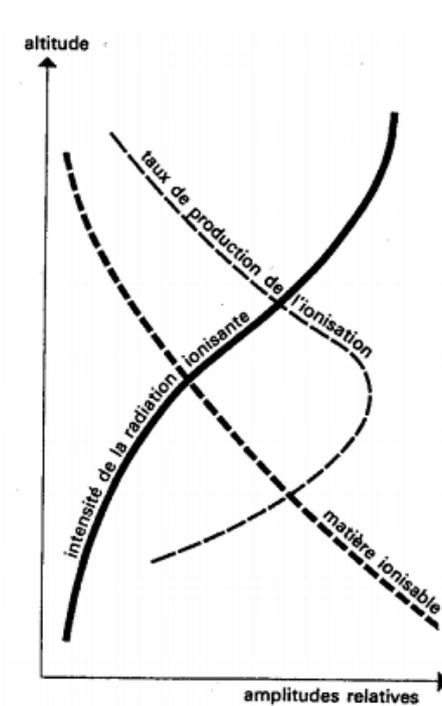


Figure 3.21. Modèle Chapman de la formation de l'ionosphère (Chapman et Ferraro 1931)

3.5- La structure de l'ionosphère

Il y a 3 couches dans l'ionosphère: les couches D, E et F durant la journée, seule la région F supérieure se maintenant de façon significative de nuit. La Figure 3.22 illustre schématiquement les profils de densité électronique de jour et de nuit, la courbe bleue correspondant au profil typique de jour, la courbe verte à un profil typique de nuit.

- a. **La région D** se situe entre 50 et 90km et coïncide avec la mésosphère. Les ions qui la composent proviennent de l'ionisation du monoxyde d'azote (NO) par le rayonnement

UV solaire, les rayons X et, de nuit essentiellement, de la capture d'un électron par des molécules d'oxygène O_2 . La couche D est donc composée d'ions positifs NO^+ , d'ions négatifs O_2^- (principalement de nuit) et d'électrons. En fait ces ions évoluent en partie par la formation d'agrégats rassemblant les ions originaux et des molécules d'eau.

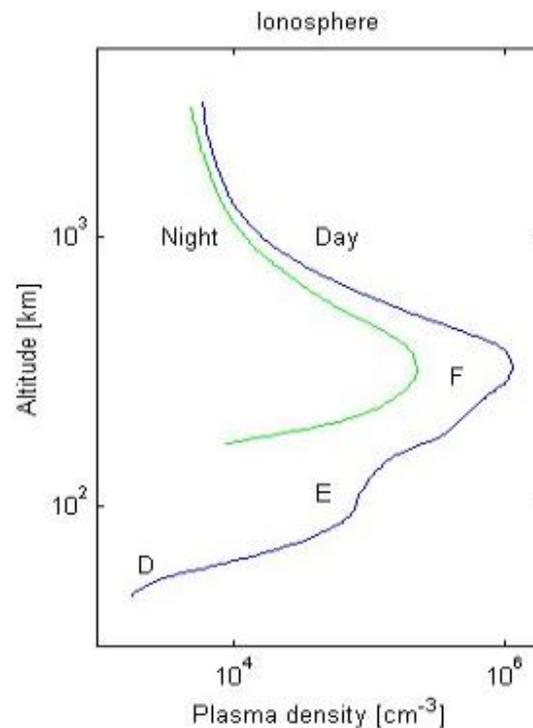


Figure 3.22. Les couches de l'ionosphère de jour et de nuit. (Bauer, 1973)

- b. **La couche E**, située entre 90 et 150km, provient de l'ionisation de la molécule d'oxygène (O_2) et de la molécule d'azote (N_2) par les photons EUV et, à un niveau moindre, par les rayons X. La couche E disparaît rapidement de nuit, la densité diminuant de 2 ou 3 ordres de grandeur, sauf (i) lorsque la structure en altitude des vents neutres entraînent la formation de couches E sporadiques très fines à partir des ions météoritiques et (ii) à haute latitude où l'activité aurorale et les précipitations d'électrons énergiques maintiennent des densités fortes.
- c. **La région F**, créée principalement par le rayonnement EUV s'étend depuis 150km jusqu'à l'exosphère. Le jour, elle comporte deux couches (F1 et F2). La couche F1 est située entre 150 et 200 km environ. La couche F2 s'étend au-delà de 200 km et dans l'exosphère et est la seule à subsister la nuit, en raison d'une part des longues constantes de temps des réactions qui contrôlent les pertes des ions et des électrons, d'autre part du transport du plasma le long des tubes de force du champ magnétique

terrestre qui vident partiellement le réservoir magnétosphérique au profit de l'ionosphère supérieure.

On donne brièvement dans les paragraphes qui suivent les équations qui permettent de modéliser la formation et la dynamique de l'ionosphère supérieure.

3.6- Équations de continuité

Les équations de continuité décrivent les variations de densité des différents constituants. Elles comportent 3 termes qui modélisent la production (P), les pertes (L) et le transport dans une cellule élémentaire de l'ionosphère qui, en raison des propriétés du mouvement des particules, est un élément d'un tube de force du champ magnétique terrestre. La production des ions et des électrons est due à la photo-ionisation du côté jour et aux précipitations de particules dans la zone aurorale. Les pertes, dues aux processus d'attachement et de recombinaison, font disparaître les ions et les électrons, le terme de transport rend compte du mouvement des ions et des électrons à travers la cellule élémentaire de l'ionosphère. Pour une espèce r l'équation de continuité s'écrit donc:

$$\frac{\partial N_r}{\partial t} = P(N_r) - L(N_r) - \vec{\nabla} \cdot (N_r \vec{V}_r) \quad (3.1)$$

Où $P(N_r)$ est le taux de production des particules r , $L(N_r)$ le taux de perte par réactions chimiques (attachement et recombinaison) et $\vec{\nabla} \cdot (N_r \vec{V}_r) = \text{div}(N_r \vec{V}_r)$ est le taux de transfert des particules r vers les régions extérieures, \vec{V}_r la vitesse moyenne.

3.7- Équations de mouvement

On considère un régime stationnaire pour écrire l'équation de mouvement sous la forme :

$$F = m\vec{g} = m \frac{d\vec{V}_r}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

Ce qui donne les 2 équations suivantes pour chaque espèce (i) d'ions et pour les électrons:

Pour les ions :

$$0 = m_i \vec{g} - \frac{1}{N_i} \vec{\nabla} (N_i k T_i) + e(\vec{E} + \vec{V}_i \wedge \vec{B}) - m_i \nu_{in} (\vec{V}_i - \vec{V}_n) - m_e \nu_{ei} (\vec{V}_i - \vec{V}_e) \quad (3.3)$$

Pour les électrons:

$$0 = m_e \vec{g} - \frac{1}{N_e} \vec{\nabla} (N_e k T_e) - e(\vec{E} + \vec{V}_e \wedge \vec{B}) - m_e \nu_{en} (\vec{V}_e - \vec{V}_n) - m_e \nu_{ei} (\vec{V}_e - \vec{V}_i) \quad (3.4)$$

Dans ces équations, la signification physique des différents termes est la suivante :

- force due à la gravité: $\vec{P} = m\vec{g}$,

- force de pression: $\vec{F}_p = \frac{1}{N}\vec{\nabla}(NkT)$

Où N et T sont respectivement la concentration et la température de la particule chargée

- force de Lorentz \vec{F}_{en} : $\vec{F}_{en} = \pm e(\vec{E} + \vec{V}_n \times \vec{B})$

Où e est la charge élémentaire, le signe « + » pour les ions positifs et le signe « - » pour les électrons, \vec{B} et \vec{E} sont les vecteurs champ électrique et champ magnétique.

- force de collision \vec{F}_c qui traduit l'effet des collisions avec les particules neutres c'est à dire l'échange de quantité de mouvement dans le référentiel des neutres: $\vec{F}_c = m\nu(\vec{V} - \vec{V}_n)$

Où m est masse et \vec{V} est vitesse de la particule chargée, ν la fréquence de collision entre les particules chargées et les neutres et \vec{V}_n , la vitesse des neutres.

3.7.1- Dans la direction perpendiculaire

Dans la direction perpendiculaire au champ magnétique terrestre on peut négliger la gravité et les gradients de pression devant les autres forces. Les équations (3.3) et (3.4) sont réduites à :

$$e(\vec{E} + \vec{V}_{i\perp} \wedge \vec{B}) = m_{i\perp} \nu_{in\perp} (\vec{V}_{i\perp} - \vec{V}_{n\perp}) \quad (3.5)$$

$$e(\vec{E} + \vec{V}_{e\perp} \wedge \vec{B}) = 0 \quad (3.6)$$

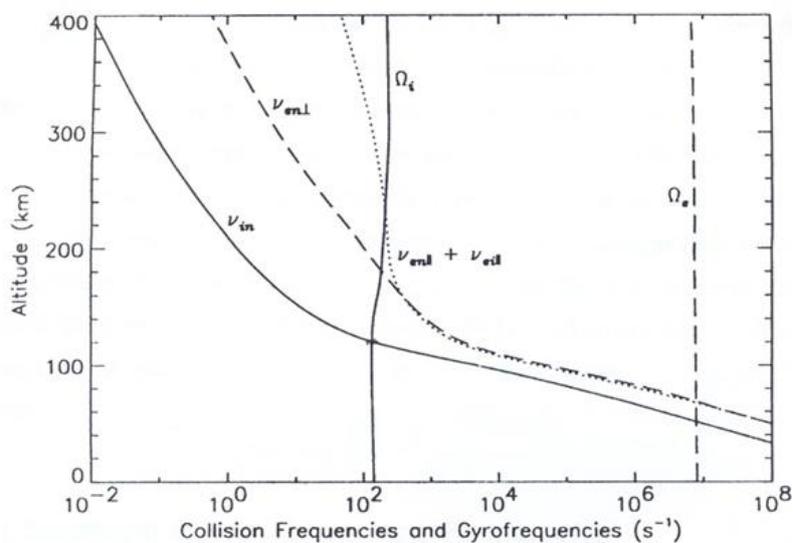


Figure 3.23. Fréquences de collision et gyrofréquences (Richmond, 1995)

La *Figure 3.23* représente les profils en altitude des fréquences de collision entre ions et neutres, électrons et neutres, et les gyrofréquences des ions $\Omega_i = \frac{eB}{m_i}$ et des électrons $\Omega_e = \frac{eB}{m_e}$

Dans la région E, la gyrofréquence des ions, Ω_i , est de l'ordre de grandeur des collisions entre les ions et les neutres ($\Omega_i \approx \nu_{in}$), la vitesse des ions dépend des collisions et de la gyrofréquence. La gyrofréquence des électrons, Ω_e , est très supérieure aux collisions entre les électrons et les neutres ($\Omega_e \gg \nu_{en}$), la vitesse des électrons dépend uniquement de la gyrofréquence.

On a donc

$$\vec{V}_i \neq \vec{V}_e \quad (3.7)$$

Et l'expression de la densité de courant électrique dans région E de l'ionosphère est :

$$\vec{J} = N_e e (\vec{V}_i - \vec{V}_e) \quad (3.8)$$

Où, N_e est la densité électronique, e est la charge de l'électron, \vec{V}_i , \vec{V}_e les vitesses des ions et des électrons.

Dans la région F (au-dessus de 160km), $\nu_{en} \ll \Omega_e$ et $\nu_{in} \ll \Omega_i$; Les vitesses des ions et des électrons dans la direction perpendiculaire sont égales et sont uniquement dues à la force de Lorentz

$$\vec{V}_i = \vec{V}_e = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (3.9)$$

La densité de courant électrique dans région F égale zéro, $\vec{J} = 0$.

3.7.2- Dans la direction parallèle

Equation de mouvement pour les ions :

$$0 = m_i \vec{g} - \frac{1}{N_i} \vec{\nabla} (N_i k T_i) - m_i \nu_{in} (\vec{V}_{i//} - \vec{V}_{n//}) \quad (3.10)$$

Equation de mouvement pour les électrons

$$0 = m_e \vec{g} - \frac{1}{N_e} \vec{\nabla} (N_e k T_e) - e \vec{E}_{//} - m_e \nu_{en} (\vec{V}_{e//} - \vec{V}_{n//}) \quad (3.11)$$

Vitesse des ions :

$$\vec{V}_{i//} = \vec{V}_{n//} + \vec{V}_{d//} \quad (3.12)$$

Vitesse des électrons :

$$\vec{V}_{e//} = \vec{V}_{n//} + \vec{V}_{d//} - \frac{\vec{J}_{//}}{N_e \cdot e} \quad (3.13)$$

Où $\vec{V}_{n//}$ est la vitesse des neutres, $\vec{V}_{d//}$ est la vitesse de la diffusion ambipolaire sous l'influence du gradient de la pression et la gravité, $\vec{J}_{//}$ est le courant parallèle aux lignes du champ magnétique, N_e est la densité des électrons et e est la charge de l'électron.

En dessous de 180km, la vitesse de diffusion ambipolaire est négligeable:

$$\vec{V}_{i//} \cong \vec{V}_{n//} \quad (3.14)$$

3.8- Equations d'énergie

3.8.1- Equation de conservation de l'énergie pour les ions

$$L_{ela} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} N_i k T_i \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + F_{in} = 0 \quad (3.15)$$

Où :

L_{ela} sont les collisions élastiques entre les ions et les autres particules ou atomes, 2 parties : collision entre électrons et neutres (L_{en}) et collision entre ions et électrons (L_{ei}).

$-\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} N_i k T_i \right)$ est la variation d'énergie interne, ce terme est petit devant le terme de collisions.

$\frac{\partial}{\partial z} \left(-K \frac{\partial T_i}{\partial z} \right)$ est la conduction ionique qui est négligeable à 300 km.

F_{in} : l'apport d'énergie due à la friction entre les ions et les neutres.

3.8.2- Equation de conservation de l'énergie pour les électrons

$$Q_e - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} N_e k T_e \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + L_{ela} + L_{SF} + F_{en} + L_e N_{2vib} = 0 \quad (3.16)$$

Où :

Q_e est l'apport d'énergie par la production solaire.

$\frac{3}{2} N_e k T_e$ est l'énergie interne du gaz.

$K_e \frac{\partial T_e}{\partial z}$ est le terme le flux de conduction thermique.

L_{ela} est le terme de collisions élastiques entre gaz stationnaires, il se divise 2 parties: collision entre électrons et neutres (L_{en}) et collision entre ions et électrons (L_{ei}).

L_{SF} est l'énergie provenant de l'excitation ou de la désexcitation de la structure fine des niveaux 3p de l'oxygène (collisions non élastiques).

F_{en} est le terme de collisions entre gaz non stationnaires, il représente la friction entre les électrons et les neutres.

$L_{eN_{2vib}}$ est l'énergie provenant des différents états de vibration de l'atome N_2 .

3.9- Spécificités de l'ionosphère de basse latitude

Nous abordons, dans la fin de ce chapitre, les spécificités de l'ionosphère de basse latitude dans laquelle se produisent un des deux types de phénomènes que nous avons étudiés en détail au cours de ce travail.

3.9.1- La fontaine équatoriale

A l'équateur, le champ magnétique est horizontal et dirigé vers le Nord, le champ électrique, perpendiculaire au champ magnétique, est dirigé de jour suivant la direction Ouest-Est. On a donc une dérive vers le haut, avec une vitesse:

$$\vec{V} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (3.17)$$

Le plasma est donc transporté vers les altitudes plus élevées mais, sous l'effet de la gravité et du gradient de pression, s'écoule le long des tubes de force du champ magnétique vers les plus basses latitudes. Ces 2 mécanismes aboutissent à la formation d'un creux de densité électronique au niveau de l'équateur et de deux crêtes de densité aux latitudes tropicales ($\pm 15^\circ$) dans les hémisphères Nord et Sud. L'effet conjugué de la dérive et de la diffusion ambipolaire le long des lignes de force est ainsi à l'origine du phénomène de fontaine équatoriale. La *Figure 3.24* présente un schéma de la fontaine équatoriale et les profils en fonction de la latitude du Contenu Total en Electron à la Verticale, VTEC.

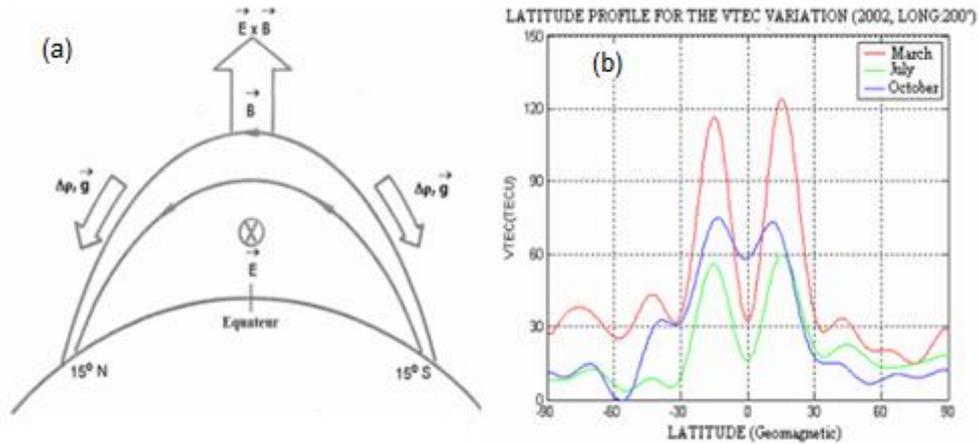


Figure 3.24. La fontaine équatoriale.

(a): Schéma de la fontaine équatoriale Henderson S.B., 2005; (b): Profils en fonction de la latitude du Contenu Total en Electron à la Verticale, VTEC Oliveira and Walter, 2005

3.9.2- L'électrojet équatorial

Les observations montrent que l'amplitude de la composante horizontale du champ magnétique, H, aux très basses latitudes, est plus grande que celle des moyennes latitudes (Figure 3.25). Ce fait est dû à l'existence d'un système de courants, appelé électrojet équatorial EEJ, qui s'écoule le long de l'équateur magnétique, il circule vers l'ouest, dans une bande de latitude d'environ $\pm 3^\circ$ de part et d'autre de l'équateur magnétique.

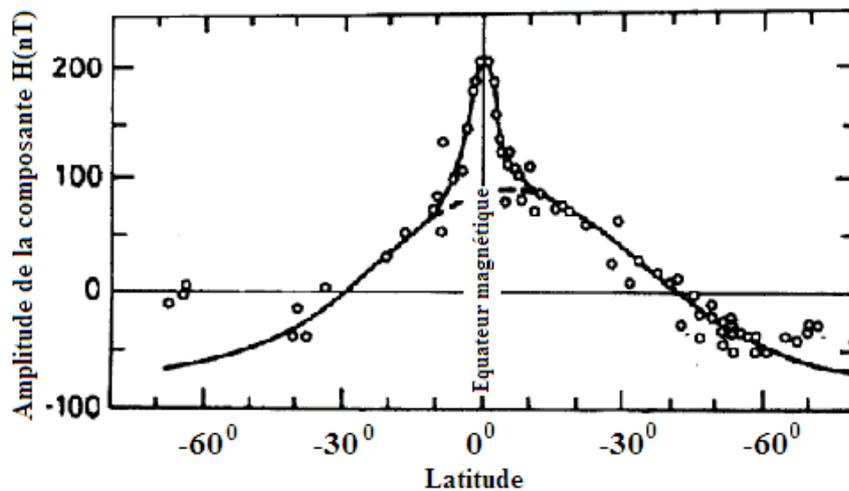


Figure 3.25. L'électrojet équatorial EEJ (Jacobs, 1990)

3.9.3- Le 'Pre Reversal Enhancement' (PRE)

La dérive du champ électrique $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ produit une vitesse verticale dirigée vers le haut qui fait monter les couches ionosphériques le jour (voir *Figure 3.24*). Cette vitesse est due à un champ électrique dirigé vers l'Est le jour. La vitesse verticale est dirigée vers le bas, la nuit, car le champ électrique est alors dirigé vers l'ouest ce qui produit une descente de l'ionosphère vers les plus basses altitudes. Cependant, on observe qu'entre 18.00 et 19.00 LT, le champ électrique s'accroît avant de s'inverser et crée ainsi une forte augmentation de la vitesse verticale. La *Figure 3.26* de Fejer et al. (1991) présente les vitesses verticales observées à Jicamarca au Pérou. Ce phénomène s'appelle le 'Pre Reversal Enhancement', PRE. Cette figure représente la vitesse verticale mesurée par le radar de Jicamarca pour les 3 saisons (équinoxe, été et hiver) et pour différentes valeurs de l'indice magnétique K_p .

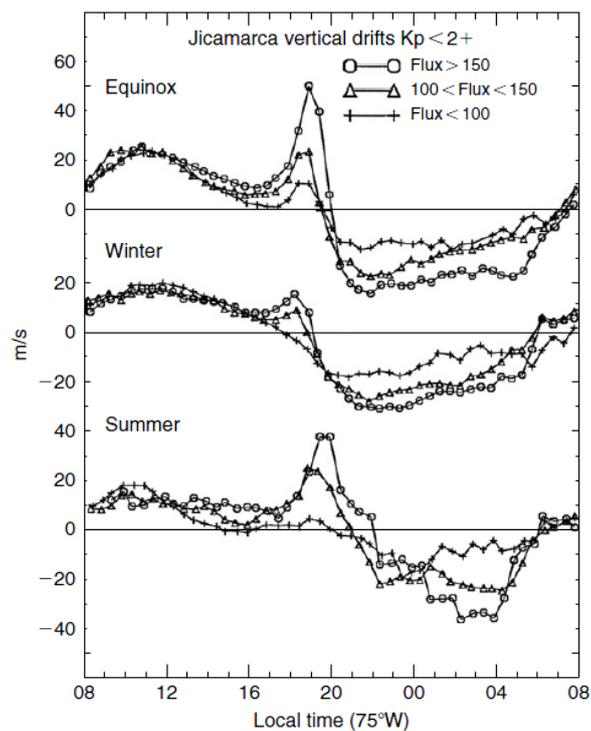


Figure 3.26. Vitesses verticales moyennes du plasma à Jicamarca pendant l'équinoxe (Mars-Avril, Septembre- Octobre), hiver (Mai-Août), été (Novembre- Février) pour 3 valeurs de flux solaire (Fejer et al., 1991)

Le fort accroissement de la vitesse verticale juste après le coucher du Soleil provoque une montée rapide du plasma de la région F. Cependant, après le coucher du Soleil et en l'absence d'ionisation, la densité électronique dans la région F1 aux altitudes inférieures à 180 km chute

rapidement car les réactions de perte sont rapides. Au contraire, les constantes de temps beaucoup plus longues des réactions de recombinaison dans la région F2 aux altitudes supérieures à ~ 250 km entraînent une faible évolution de la densité électronique qui conserve donc des valeurs beaucoup plus élevées que celles de la région F1, souvent de 2 ordres de grandeur. Le plasma de faible densité de la région F1, dit « léger », se situe donc au-dessous du plasma de forte densité, dit « lourd » et, l'interface entre ces deux milieux de densité différente est sujette à une instabilité de type Rayleigh-Taylor. La *Figure 3.27* représente ce phénomène et la création de « bulles de plasma » (*Kelley, 2009*). Cette instabilité entraîne la formation d'irrégularités de très grande amplitude dans le plasma ionosphérique qui affectent les signaux électromagnétiques et provoquent des scintillations sur le signal GPS (*Basu and Basu, 1981*), l'apparition de F diffus sur les ionogrammes (*Abdu et al., 1983*) et des « plumes » sur les observations des radars VHF (*Woodman and La Hoz, 1976*).

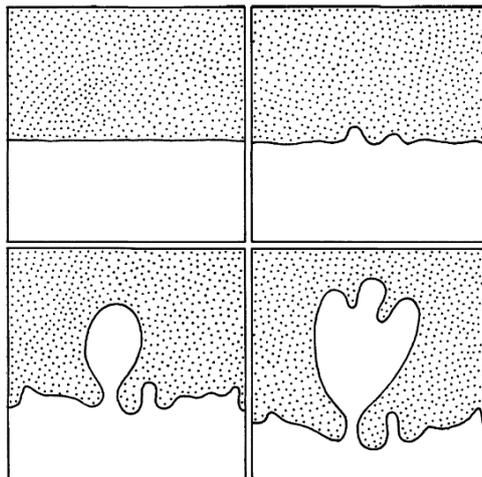


Figure 3.27. Schéma séquentiel, à partir de photos, du développement d'une instabilité de Rayleigh Taylor. Fluide le plus lourd, au-dessus d'un fluide plus léger et transparent (Kelley,2009)

CHAPITRE 4

PERTURBATIONS OBSERVEES SUR LES ORBITES DE NUIT DE DEMETER – CARACTERISTIQUES et CLASSIFICATION

Ce chapitre est consacré à la mise en évidence des perturbations observées régulièrement sur les données des instruments plasma ISL et IAP pendant des orbites de nuit de DEMETER et à la description de leurs caractéristiques morphologiques qui ont été utilisées pour leur classification. Ce travail a servi à établir la base de données concernant les deux types d'évènements les plus intéressants auxquels sont consacrés les chapitres 5 et 6.

4.1- Activité solaire et magnétique de 2005 à 2010

Les données de DEMETER que nous avons exploitées s'étendent sur la période de 6 ans allant de 2005 à 2010. Pendant cette période, l'activité solaire est passée par un minimum très prononcé en 2008-2009, le plus faible depuis une centaine d'années et comparable à ceux observés en 1876-1877 et 1900-1901 (cf. Chap. 3). Pendant cette même période, l'activité magnétique moyenne annuelle a diminué pour atteindre une valeur minimale en 2009, la plus petite enregistrée depuis 100 ans, après un maximum en 2003 (cf. Chap 3).

<i>Année</i>	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Activité solaire(SSN)</i>	29.8	15.2	7.5	2.9	3.1	16.5
<i>Activité solaire (F10.7 cm)</i>	92.3	80	73.1	68.7	70.5	80
<i>Aa indice (nT)</i>	23	16	15	14	8	12
<i>Nb total orbites</i>	4135	4518	4192	4566	4746	4287

Tableau 4.1. *Activité solaire et magnétique moyenne annuelle et nombre annuel d'orbites de Demeter.*

Le *Tableau 4.1* donne les valeurs moyennes annuelles caractérisant l'activité solaire et magnétique de 2005 à 2010. Un point important à retenir est donc que les observations de DEMETER que nous avons utilisées concernent deux années 2008 et 2009 d'un minimum très profond d'activité solaire et magnétique et trois années, 2005 et 2006 à la fin du cycle 23 et 2010 au début du cycle 24 pendant lesquelles les activités solaire et magnétique étaient modérées. Comme on le verra dans les chapitres 5 et 6 l'année 2007 apparaît comme une année de transition dont les caractéristiques empruntent à la fois aux années modérément actives 2005, 2006 et aux années du minimum très prononcé 2008 et 2009.

4.2- Perturbations caractéristiques sur les orbites de nuit

Les *Figures 4.1a* et *4.1b* montrent un exemple des tracés fournis par les logiciels de visualisation des grandeurs physiques développés par l'équipe du LPC2E que nous avons utilisés systématiquement pour la reconnaissance des perturbations. Ils fournissent une vue globale des variations :

- des 4 paramètres physiques essentiels du plasma ionosphérique : la densité électronique, N_e (*a*); la température électronique, T_e (*b*); la densité des ions, N_i (*c*) ; la température ionique, T_i (*d*), et,
- sous la forme d'un spectrogramme, de la composante perpendiculaire au plan d'orbite du champ électrique AC dans la gamme *ELF* jusqu'à 1 kHz (*d*).

En dehors d'évènements solaires ou magnétosphériques majeurs (CME, orages magnétiques, ...), les profils de ces grandeurs le long de l'orbite présentent une morphologie relativement régulière qui, si elle dépend assez fortement de la saison et du niveau d'activité magnétique, permet, néanmoins, de discerner dans la plupart des cas, les grandes régions traversées par le satellite : moyennes et basses latitude correspondant à l'intérieur de la plasmasphère, zone sub-aurorale et, en début et fin de passage zone aurorale. La résolution de ces tracés est suffisante pour discerner facilement des anomalies dont la durée minimum serait de 30s, soit ~ 200 km le long de l'orbite, et qui peuvent être de beaucoup plus grande échelle, jusqu'à plusieurs milliers de km. La turbulence électrostatique, observée pour des fréquences inférieures à $\sim 300-400$ Hz sur les spectrogrammes, complète utilement les mesures plasma car elle montre l'existence d'irrégularités de petite échelle à l'intérieur d'anomalies à moyenne échelle. C'est un indicateur utile du niveau d'instabilité locale de l'ionosphère qui est, le plus souvent, la conséquence des processus dynamiques de l'ionosphère et des gradients qui en résultent.

On remarquera sur la *Figure 4.1b* des augmentations rapides et de grande amplitude sur le profil de la température ionique. Ces signaux, qui n'ont pas de contrepartie significative sur les autres paramètres, résultent d'un fonctionnement défectueux du logiciel de traitement sur environ 5 à 10% des données brutes de IAP lorsque la densité des ions oxygènes $N(O^+)$ est faible. Ils doivent évidemment être rejetés.

L'examen visuel d'un très grand nombre d'orbites a conduit à sélectionner 5 types principaux de perturbations, nommées de A à E, dans lesquelles on peut reconnaître pratiquement toutes les anomalies observées sur les profils.

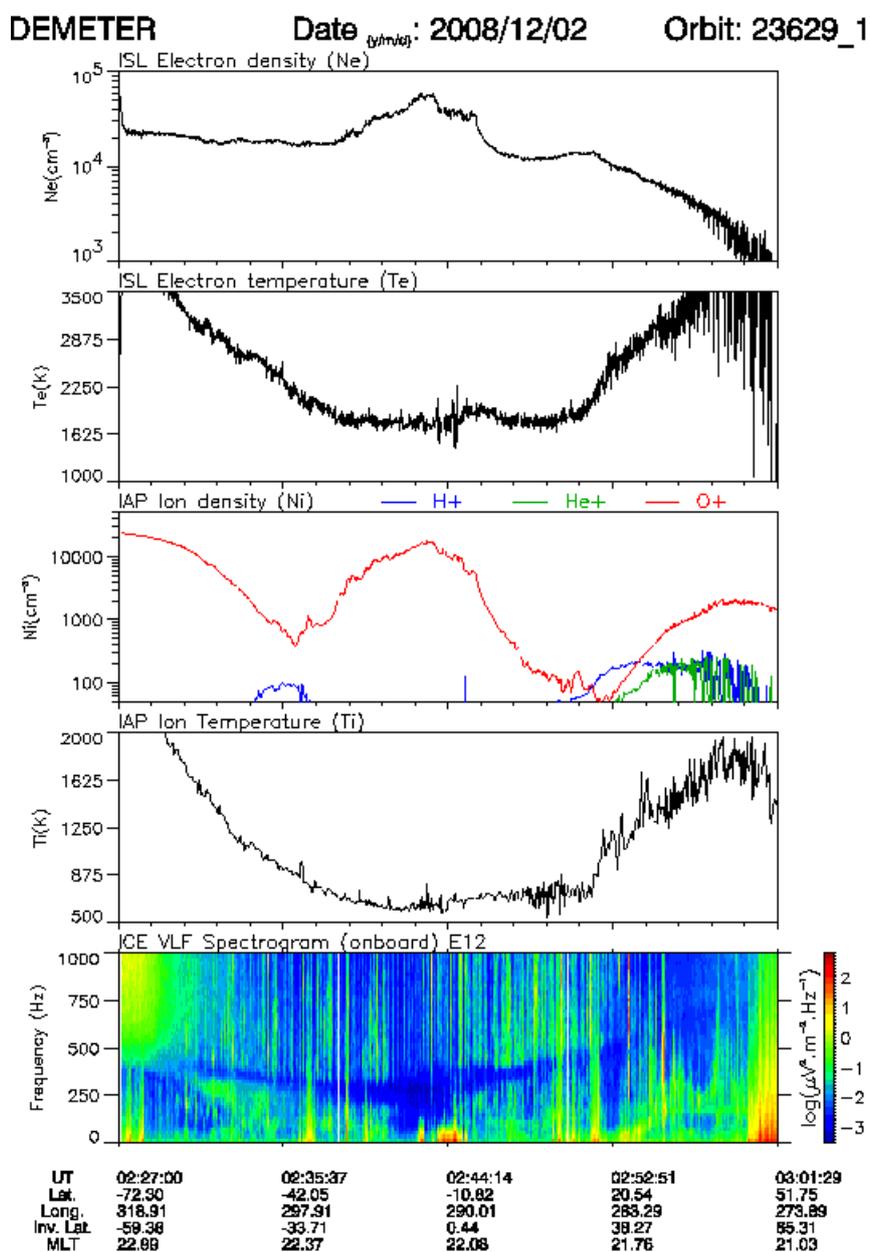


Figure 4.1.a

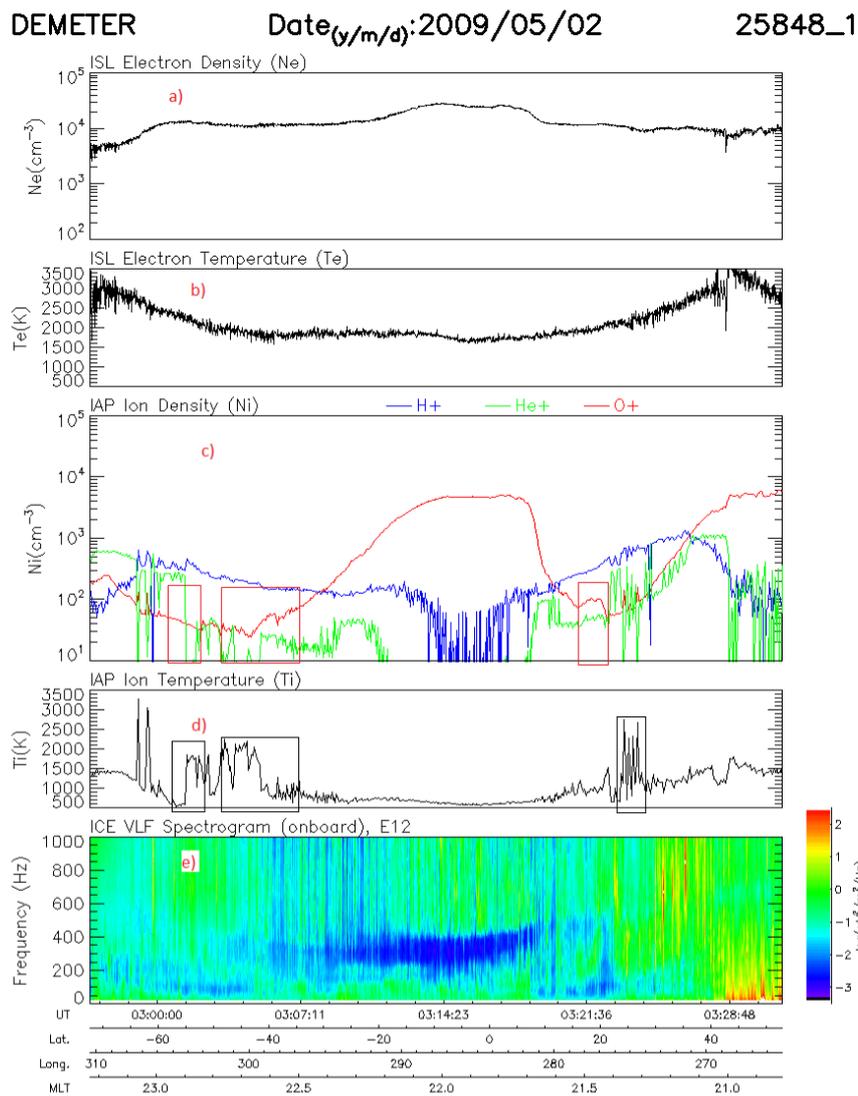


Figure 4.1.b

Figure 4.1.(a),(b) Montrant les anomalies parasites sur T_i dans les encadrements

4.2.1- Type A

Il s'agit (Figure 4.2, cercles rouges) d'irrégularités du plasma sans variation significative du niveau moyen de la densité électronique N_e . On observe clairement des fluctuations ΔN_e , ΔT_e à l'échelle de la seconde, résolution des mesures ISL (voir Chapitre 2) avec des variations $\Delta N(O^+)$, $\Delta N(H^+)$ sur des échelles de temps plus grandes que celle de ΔN_e , typiquement quelques secondes simplement parce que la résolution en temps des mesures de IAP est de $\sim 4s$ en mode Survey. On constate la présence de turbulence électrostatique (TES) associée aux gradients significatifs du plasma.

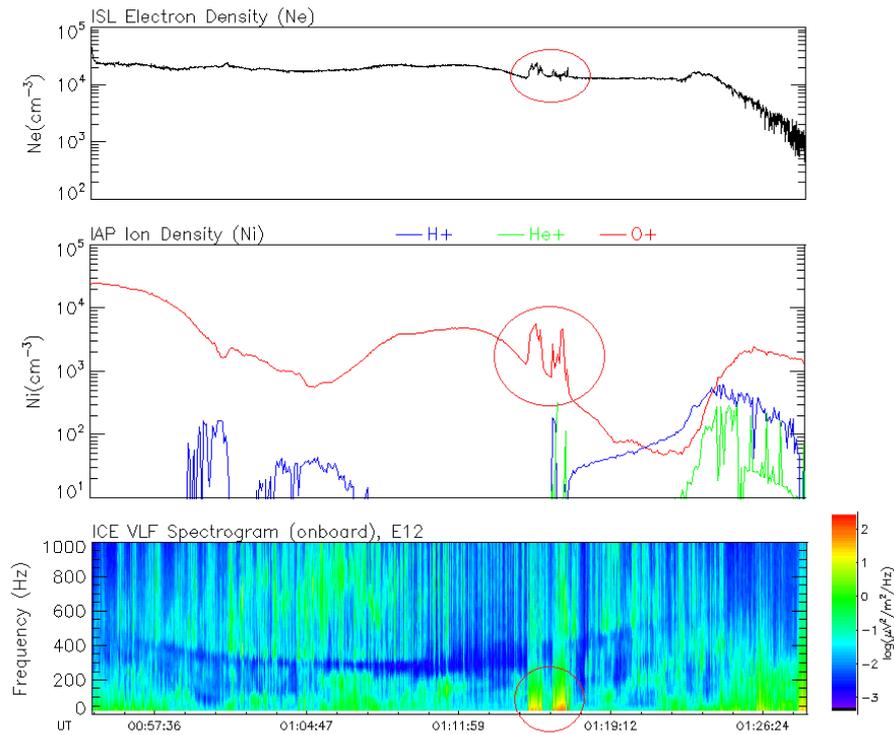


Figure 4.2. Type A

4.2.2- Type B

Caractérisé par une diminution modérée de la densité électronique N_e sur des durées de l'ordre de 1 à quelques minutes et sub-divisé en 2 sous-types, type B1, type B2 suivant la présence, ou non, à l'intérieur de la structure de fluctuations rapides de N_e détectées par l'existence de turbulence électrostatique.

- *Type B1* : (Figure 4.3), diminution de N_e d'amplitude modérée, sur un intervalle de temps de ~ 1 à quelques minutes, pas de TES.

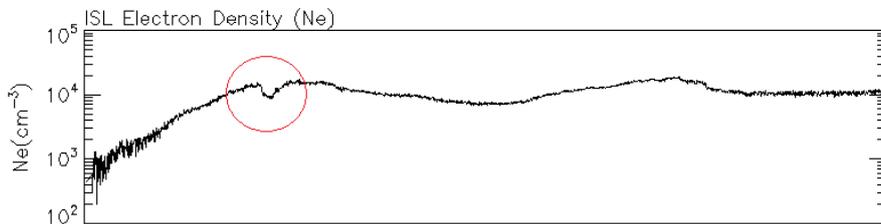


Figure 4.3. Type B1

- *Type B2* : (Figure 4.4), Diminution de N_e d'amplitude modérée à moyenne échelle (~ 1 à quelques minutes) pendant lesquelles on observe aussi des fluctuations ΔN_e , ΔT_e et la présence de turbulence électrostatique.

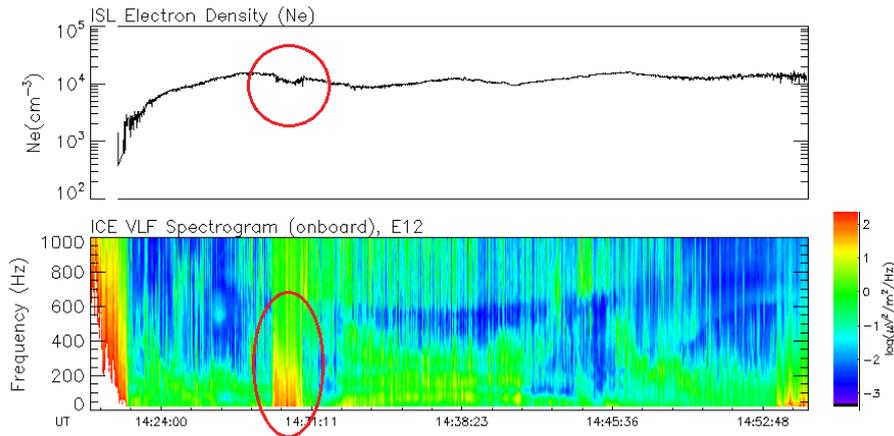


Figure 4.4. Type B2

4.2.3- Type C

Caractérisé par des variations quasi périodiques de N_e et N_i , la plupart du temps de grande amplitude sur $N(O^+)$, parfois visibles sur $N(He^+)$ mais indiscernables sur $N(H^+)$ la raison essentielle étant la faible densité des ions légers, voire leur densité au-dessous du seuil de détection pendant les évènements. Les périodes de ces oscillations varient de 20-30s à ~ 150 s. Pour certains évènements on observe clairement des oscillations semblables sur la température électronique.

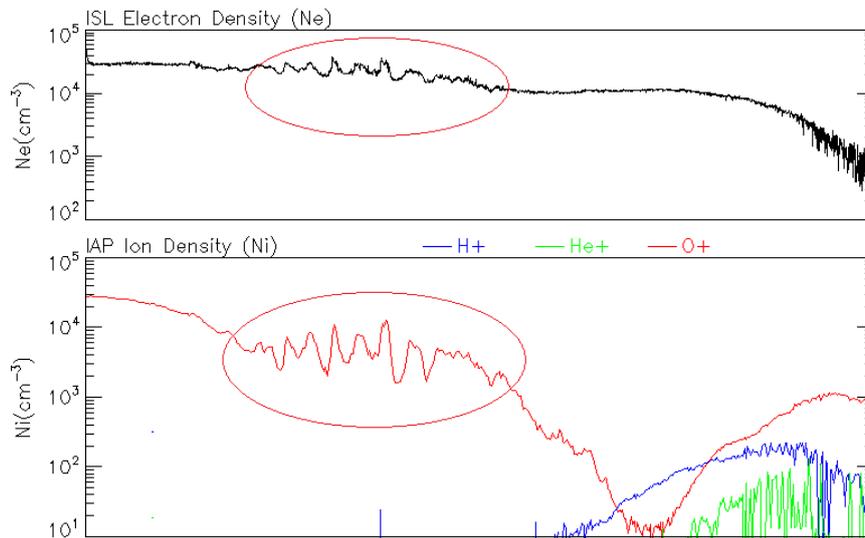


Figure 4.5. Type C

4.2.4- Type D

Caractérisé d'une façon générale par des augmentations de N_e à différentes échelles :

- structure isolée unique d'une durée de l'ordre de 1 à 2 minutes, rappelant les « plasma blobs » rapportés dans la littérature,
- 2 blobs successifs,
- structure sous forme d'un plateau donc à grande échelle d'une extension spatiale de 1000 km voire davantage. A l'intérieur de ce plateau N_e peut diminuer légèrement au voisinage du centre de ce plateau ou présenter des « trous » à moyenne échelle répartis aléatoirement à l'intérieur de la structure. Les Figures suivantes donnent des exemples caractéristiques.
- *Type D1.* (Figure 4.5) Augmentation isolée de N_e et N_i , quelquefois associée à l'apparition de turbulence électrostatique.
- *Type D2.* (Figure 4.6) 2 augmentations successives de N_e et N_i à des distances variables, très proches ou éloignées et, dans ce second cas, quelques évènements se produisent dans des régions approximativement conjuguées.
- *Type D3.* (Figure 4.7) Augmentation de N_e sous forme d'un plateau, quelquefois marquée par une diminution modérée de N_e vers le centre.
- *Type D4.* (Figure 4.8) Augmentation de N_e sous forme d'un plateau avec la présence de « trous » de N_e de faible durée (entre 1 et 2 minutes) typiques de structure à moyenne échelle.

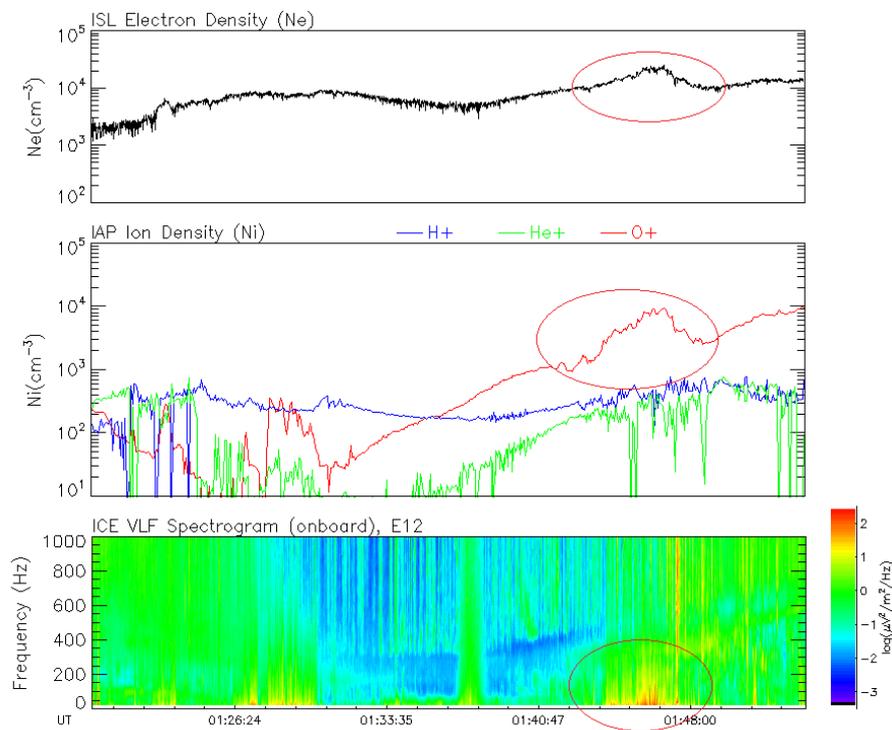


Figure 4.6. Type D1

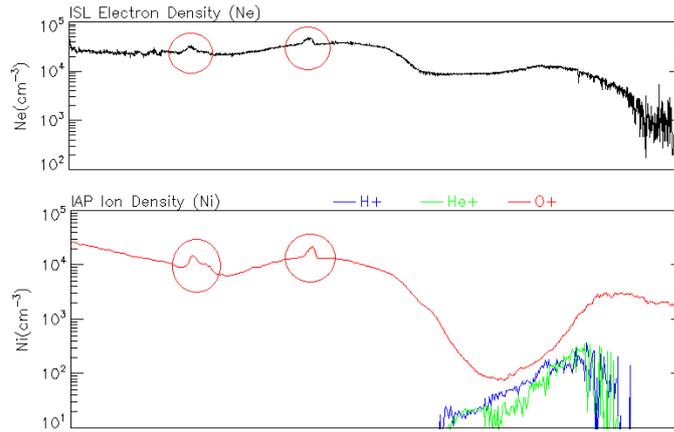


Figure 4.7. Type D2

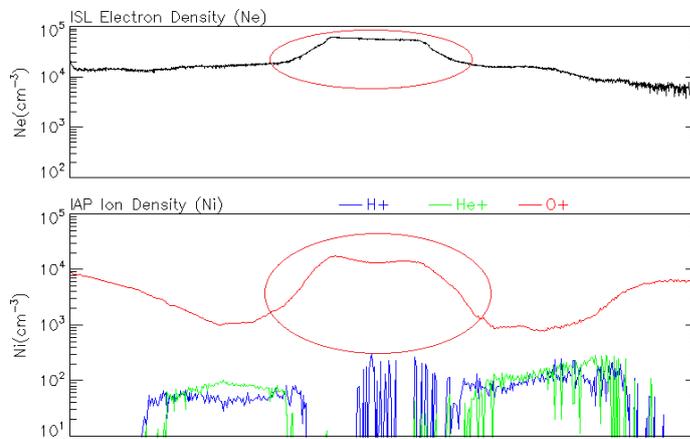


Figure 4.8. Type D3

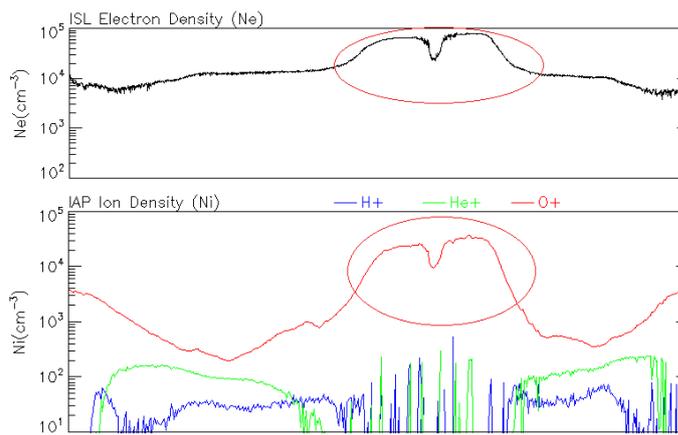


Figure 4.9. Type D4

4.2.5- Type E

Le Type E se présente sous la forme de dépressions irrégulières et très profondes de N_e et N_i , où les densités peuvent diminuer d'un ordre de grandeur avec de fortes fluctuations de petite échelle accompagnées d'une turbulence électrostatique intense. La *Figure 4.10* donne l'exemple d'un évènement d'amplitude modérée puisque les « trous » de N_e ne correspondent qu'à des diminutions d'un facteur ~ 2 au maximum. On aura reconnu évidemment un phénomène très bien connu de l'ionosphère équatoriale nocturne, les « bulles de plasma » évoquées au chapitre 3.

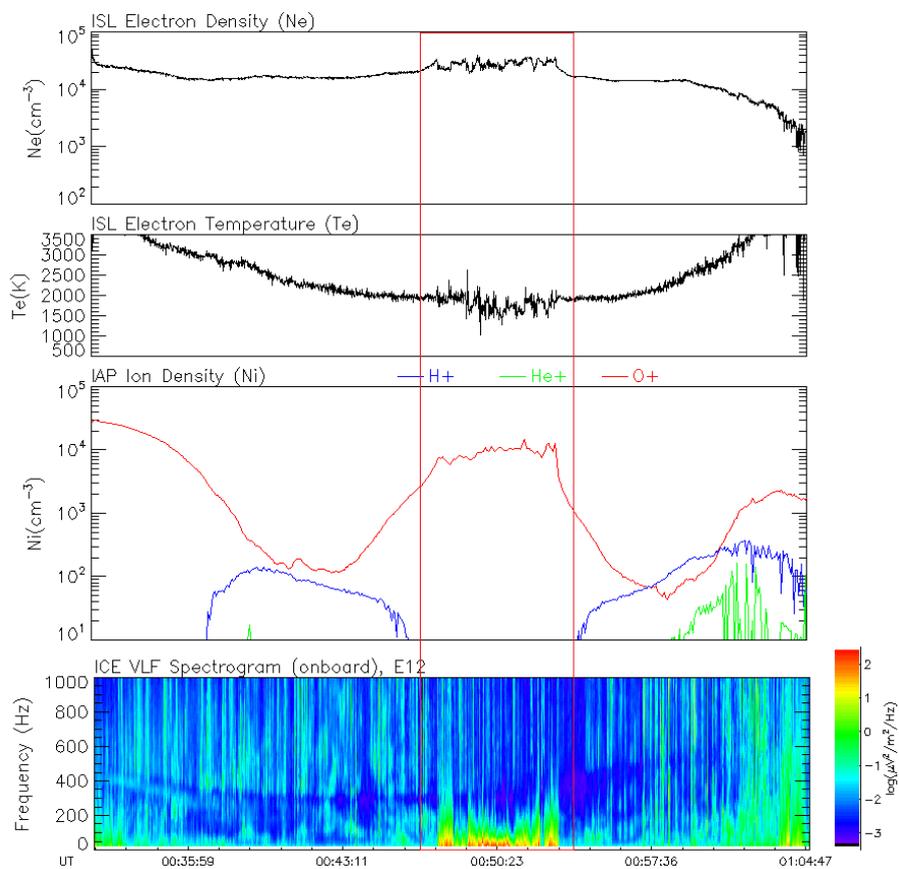


Figure 4.10. Type E, bulles de plasma.

CHAPITRE 5

PERTURBATIONS QUASI-PERIODIQUES A MOYENNE ECHELLE DANS L'IONOSPHERE DE MOYENNE LATITUDE

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux perturbations de type C, mentionnées au Chapitre 4, qui se présentent sous la forme de variations quasi périodiques de la densité du plasma le long de l'orbite. Après avoir décrit ces événements et le traitement des données, principalement de l'instrument IAP, mis en œuvre pour les caractériser de façon précise, nous présentons les résultats des études statistiques : distribution géographique, variations saisonnière et inter-annuelle et influence de l'activité solaire et magnétique. Ces perturbations s'apparentent à des perturbations ionosphériques itinérantes de moyenne échelle (MSTID) engendrées par la propagation dans la haute atmosphère d'ondes de gravité atmosphériques. Dans le texte qui suit nous utilisons fréquemment le terme « période » pour caractériser les oscillations, par exemple le temps entre 2 maxima de densité observés le long de l'orbite. Cette terminologie peut prêter à confusion : en fait, nous admettons que DEMETER traverse rapidement les perturbations et que les variations temporelles des paramètres du plasma observées par les instruments correspondent en réalité à la traversée des structures spatiales qui caractérisent les MSTID. Ce que nous mesurons ce sont donc les longueurs d'onde des MSTID évaluées en tenant compte de la vitesse orbitale du satellite de ~ 7.3 km/s. Dans les derniers paragraphes nous présentons les résultats tirés des spectres des perturbations et analysons brièvement un événement exceptionnel par son spectre quasi-monochromatique et par son intensité pour faire apparaître l'influence des MSTID sur l'électrodynamique de l'ionosphère.

5.1- Description des événements, caractéristiques principales et traitement des données

5.1.1- Détection et morphologie des événements

Sur les profils le long de l'orbite ces événements apparaissent principalement sous la forme de variations quasi périodiques de la densité électronique N_e et de la densité $N(O^+)$ des ions O^+ avec, dans certains cas, des variations de même forme décelables sur la température électronique T_e . Les périodes varient de quelques dizaines de secondes à ~ 200 s et les

oscillations sont les plus marquées sur $N(O^+)$. Les ions O^+ sont souvent majoritaires à l'altitude de DEMETER et, d'une façon générale on recense peu d'évènements où des oscillations peuvent être détectés sur les profils de la densité $N(He^+)$ des ions hélium, et nous n'avons pas observé de cas où la densité $N(H^+)$ des protons montre des oscillations semblables à celle de $N(O^+)$. Les ions légers H^+ et He^+ semblent donc beaucoup moins affectés par ces perturbations que les ions O^+ dont la source se situe dans la haute atmosphère au-dessous de l'altitude de l'orbite de DEMETER. Les variations relatives de Ne , qui est la somme de toutes les densités ioniques, sont donc de plus faible amplitude que celles de $N(O^+)$, ce qui explique la plus grande sensibilité de ce dernier paramètre. En outre, d'un point de vue pratique, les échelles pour Ne et $N(O^+)$ étant différentes sur les tracés de routine utilisés pour notre travail, les perturbations sont plus facilement visibles sur $N(O^+)$ qui a donc été utilisé systématiquement pour déterminer les caractéristiques principales des évènements comme les temps début et fin et les spectres en fréquence des variations de densité, etc... Nous donnons dans les *Figures 5.1a, b, c* trois exemples d'évènements qui montrent à la fois des similitudes mais aussi des différences notables dans leur morphologie. Comme il ne nous est pas apparu réaliste de développer un logiciel de traitement automatique qui puisse détecter de façon fiable et exhaustive tous les évènements de type C sans les confondre avec d'autres perturbations, la première partie de notre travail, assez lourde, a consisté à détecter visuellement les évènements sur l'ensemble des orbites de la période 2005-2010 soit près de 30.000 orbites. Les temps début Td et fin Tf relevés visuellement sont indiqués par des traits rouges sur les figures. La *Figure 5.1a* montre un évènement exceptionnel par sa durée, la périodicité et l'amplitude des oscillations de densité, avec un effet marqué sur Te , également détectable sur Ti . On observe également (tracé inférieur) l'apparition de turbulence électrostatique associée aux variations de la densité du plasma. Cette turbulence se développe sur les forts gradients de densité du plasma et semble donc caractéristique d'une instabilité de dérive de gradient, ce que confirment les mesures de champ électrique présentées au dernier paragraphe de ce chapitre. Les deux autres exemples des *Figures 5.1b* et *5.1c* montrent que la durée et l'amplitude des oscillations peuvent varier notablement d'un évènement à l'autre, voire pendant un évènement.

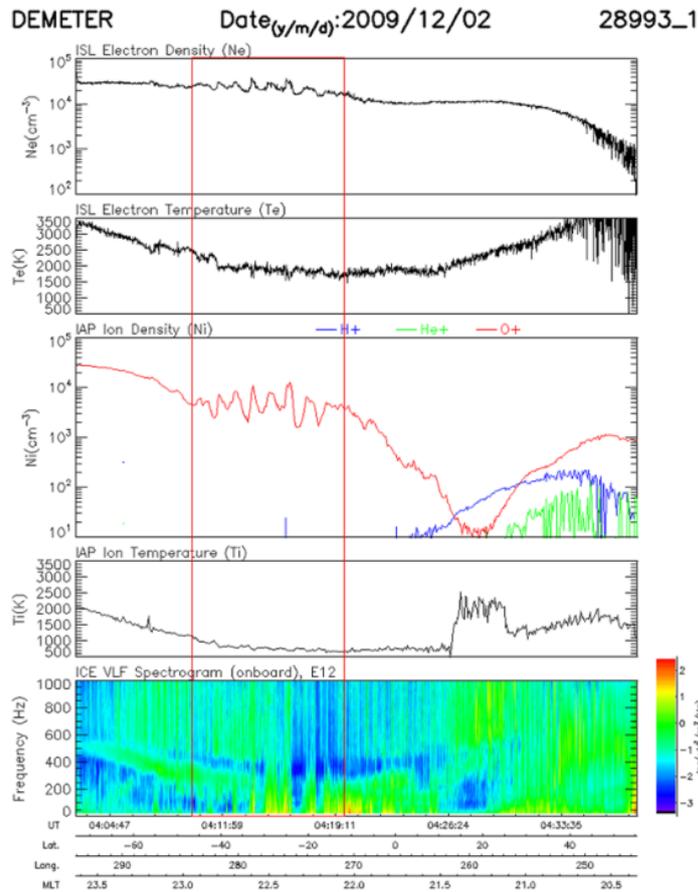


Figure 5.1.a. Evènement observé dans l'hémisphère Sud d'une durée totale de ~ 8 minutes avec des oscillations de très grande amplitude sur $N(O^+)$ atteignant $\sim 6 \cdot 10^4$ ions/cm³ pour une densité moyenne de l'ordre de $\sim 5 \cdot 10^4$ ions/cm³. L'augmentation brutale de T_i dans l'hémisphère Nord résulte d'un défaut du logiciel de traitement (voir Chapitre 4).

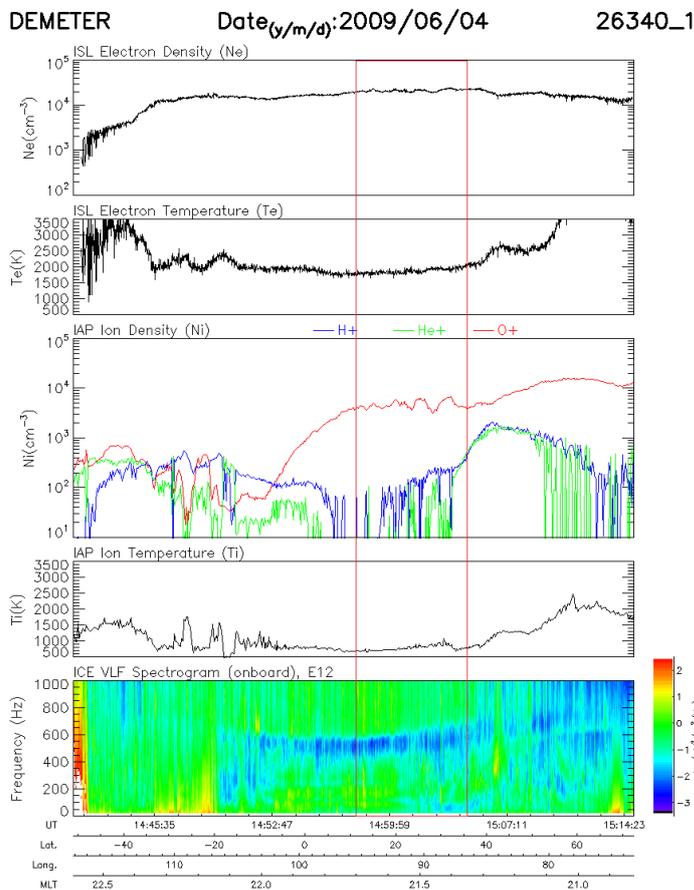


Figure 5.1b. Evènement observé dans l'hémisphère Nord, durant ~7 minutes avec des amplitudes variant d'un ordre de grandeur et atteignant un maximum de $\sim 2-3 \cdot 10^4$ ions/cm³

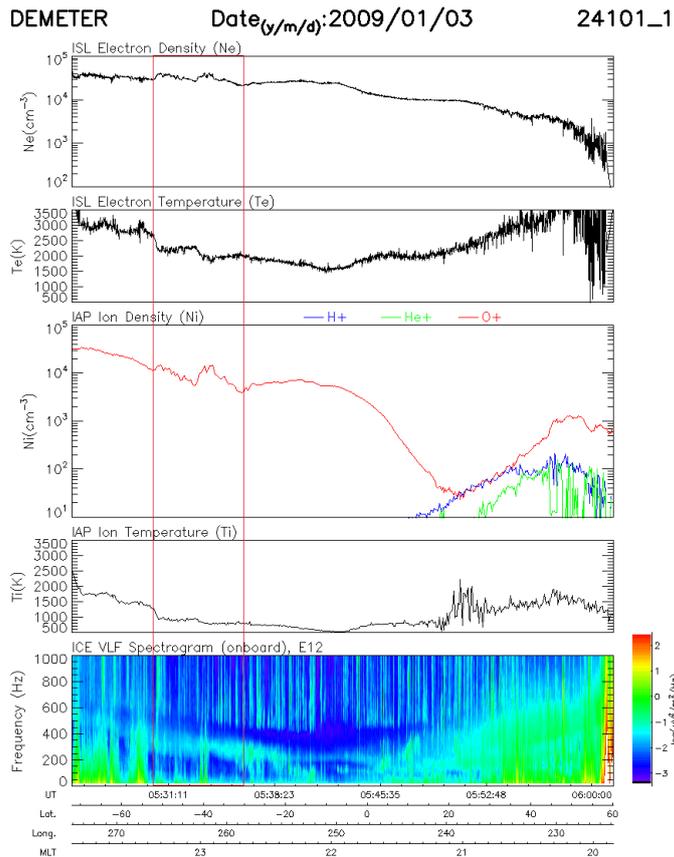


Figure 5.1c. Evènement observé dans l'hémisphère Sud, durant ~ 6 minutes et montrant sur Ne et $N(O^+)$ la superposition de 2 oscillations de grande amplitude et de longue période et d'oscillations de faible amplitude et de courte période

Les évènements de type C dont nous venons de présenter quelques exemples sont observés principalement de nuit. En effet, nous avons examiné un grand nombre d'orbites de jour pendant les mois où les évènements C sont très fréquents sur les orbites de nuit. Afin que cette comparaison ne soit biaisée ni par l'influence de l'activité magnétique ni par un effet saisonnier, nous avons choisi des mois dont la position dans le dernier cycle solaire est très différente et dans des saisons également différentes. Les résultats sont présentés dans le *Tableau 5.1* ci-dessous qui indique que nous avons examiné le même nombre d'orbites de jours et de nuit, donc que la signification statistique des résultats est excellente. On voit clairement que la probabilité d'occurrence de jour est beaucoup plus faible que de nuit, de l'ordre de 20 à 25% aux environs du solstice d'été (mai-juillet), et qu'aucun cas n'est observé de jour aux environs du solstice d'hiver (octobre-novembre) alors que le nombre d'évènements de nuit est très important avec une probabilité d'occurrence de ~ 60%. Au total on peut donc conclure que les caractéristiques de la source et/ou celles de l'ionosphère de nuit jouent un rôle déterminant pour le développement des évènements de type C, en particulier aux environs du solstice d'hiver.

	Juillet 2005	Novembre 2005	Mai 2008	Octobre 2008
Total orbites nuit	372	420	440	319
Nombre de type C sur ces orbites nuit	252	217	251	205
Total orbite jours	364	420	447	325
Nombre de type C sur ces orbites jour	56	0	79	0

Tableau 5.1. Occurrence des évènements sur les orbites de jour et de nuit

5.1.2- Traitement des données : standardisation de l'échantillonnage

Les données de l'instrument IAP ($N(O^+)$, Ti) sont disponibles avec une résolution différente suivant le mode de fonctionnement de DEMETER, 4.3s en *Survey* ou 2.2s en *Burst*. Les données de l'instrument ISL (Ne , Te) sont disponibles à une seule cadence de 1/s quelque soit le mode. L'échantillonnage des mesures de champ électrique est de 39 points/s, compatible avec la fréquence supérieure de 15 Hz de la gamme ULF.

Pour pouvoir effectuer l'analyse des données plasma le long de l'orbite indépendamment du mode de fonctionnement, nous avons choisi une résolution temporelle commune aux données de IAP et ISL soit 4s. Pour les paramètres fournis par IAP nous avons fait une simple interpolation linéaire à partir du temps t_0 de la première donnée disponible, et obtenu une valeur de $N(O^+)$ et Ti aux temps $t_n = t_0 + n * 4s$. En ce qui concerne ISL, on calcule à chaque temps t_n la valeur moyenne de Ne et Te sur 6 points, 3 avant t_n et 3 après t_n . Comme le « bruit » sur Ne et Te lié à l'algorithme de traitement est important cette moyenne permettra de filtrer partiellement les fluctuations aléatoires et de travailler sur des données plus lisses.

5.1.3- Détermination précise des temps de début et fin des évènements

Les temps Td et Tf de début et fin d'évènement déduits du dépouillement manuel sont souvent imprécis et rendent difficiles les recherches de conjugaison entre les évènements détectés au Sud et une contrepartie possible dans l'hémisphère Nord. Nous avons donc cherché à définir plus précisément les temps début et fin d'évènement T_1 et T_2 . Le principe de ce traitement consiste à reconstruire au mieux le profil moyen non perturbé (c'est-à-dire celui qui aurait été observé en l'absence d'évènement) et de détecter le début et la fin de l'évènement par l'apparition d'un écart significatif entre les mesures et ce profil moyen.

Dans un premier temps, nous étendons l'intervalle de temps considéré entre 2 temps T_A et T_B situés respectivement 32 points (soit $\sim 128s$) avant T_d et 32 points après T_f et représentons le profil de $\log[N(O^+)]$ sous la forme d'un polynôme $P(t)$. Comme les variations à grande échelle de $N(O^+)$ dans les intervalles de temps considérés peuvent être importantes (souvent supérieures à un ordre de grandeur), cet ajustement est effectué sur les valeurs de $\log(N(O^+))$ afin de réduire la dynamique des signaux sur lesquels se fait l'ajustement et améliorer la stabilité de celui-ci. En outre, pour les écarts des points au polynôme d'ajustement, ceci revient à considérer des écarts relatifs en dN/N , ce qui est physiquement et expérimentalement raisonnable. Le choix du degré du polynôme $P(t)$ résulte d'un compromis : un degré élevé permet de reproduire des profils de forme complexe mais peut être instable et faire apparaître des oscillations indésirables, un degré moins élevé donne un ajustement moins précis mais plus stable. Les essais effectués sur des cas test nous ont conduits à adopter un polynôme de degré 7.

L'ajustement de $P(t)$ sur les données est contraint de façon forte sur le profil observé avant (entre T_A et T_d) et après (entre T_f et T_B) l'évènement pour imposer des conditions aux limites assez rigides susceptibles d'éviter l'instabilité de $P(t)$. La contrainte est réduite pendant l'évènement de façon à ce que $P(t)$ fournisse la courbe moyenne que nous recherchons sans reproduire des oscillations qui sont la marque des évènements de type C. En pratique, ceci a été réalisé en utilisant le sous-programme *Curvefit* de IDL et en imposant un poids fort, $w_i=5$, sur les points des conditions aux limites $[T_A, T_d]$ et $[T_f, T_B]$ et un poids plus faible, $w_i=1$, sur les points dans l'intervalle $[T_d, T_f]$. Par la suite le paramètre physique que nous utiliserons pour analyser les perturbations sera

$$\delta = [N(O^+)(t) - Nfit(t)] / Nfit(t)$$

où $Nfit(t)$ est la densité ajustée obtenue à partir de $P(t) = \log[Nfit(t)]$. δ exprime les perturbations normalisées indépendamment du niveau moyen de la densité pendant l'évènement. On normalise par rapport à l'ajustement $Nfit(t)$ qui est exempt du bruit présent sur les mesures, et évite donc des fluctuations de δ qui serait sans signification physique. Cette normalisation est nécessaire car la densité moyenne $N(O^+)$ peut varier d'un ou deux ordres de grandeur d'un évènement à l'autre suivant la saison, cycle solaire etc... Ce qui est important pour quantifier une perturbation c'est l'amplitude des variations que le phénomène va induire sur la densité moyenne, autrement dit ce sont les variations relatives de $N(O^+)$, d'où la définition de δ . La validité de l'ajustement s'apprécie sur la courbe représentant le

paramètre δ qui doit être ~ 0 pour $T_A < t < T_d$ et $T_f < t < T_B$ et centrée sur 0 entre T_d et T_f en supposant que les oscillations sont à peu près symétriques par rapport à la ligne de base que représente cet ajustement. Ceci est le cas lorsque l'évènement se présente comme un train d'ondes qui dure plusieurs périodes, mais ce n'est pas aussi vrai lorsque l'évènement comprend des oscillations de période, d'amplitude et de durée différentes où lorsque la perturbation comporte une ou deux impulsions. Ceci aura des implications sur l'analyse spectrale et on reviendra sur cette question au paragraphe 5.6.

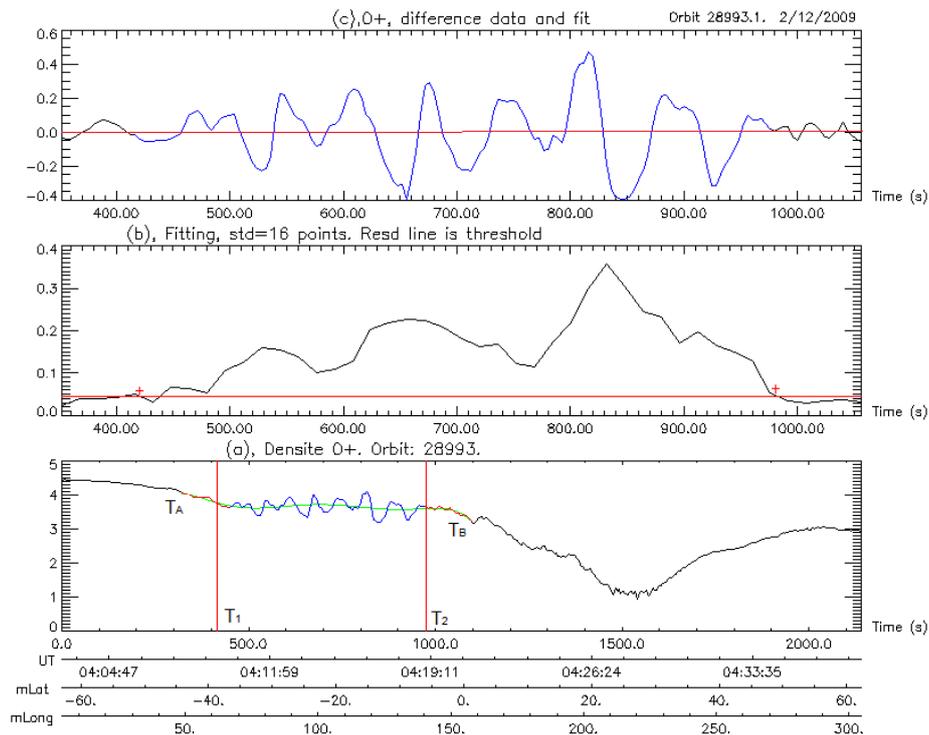


Figure 5.2. (a) profil de $N(O^+)$ le long de l'orbite, durée de l'évènement reconnue visuellement en bleu, intervalles de temps ajoutés avant et après l'évènement en rouge, ajustement $P(t)$ en vert, (b) écart-type σ calculé sur des intervalles de 16 points, glissant de 4 points et détermination de T_1 et T_2 , (c) $\delta = [N(O^+)_{\text{mesuré}} - P(t)]/P(t)$, perturbation normalisée.

La dernière étape du traitement est illustré sur la Figure 5.2. nous prenons comme exemple la détermination du temps T_1 de début l'évènement à partir du temps T_A . Le principe est identique pour la détermination du temps T_2 de fin d'évènement à partir du temps T_B mais en remaontant le temps. On calcule la valeur moyne δ_m l'écart-type σ de δ sur des intervalles de 16 points (64s, donc inférieur à la période typique des oscillations) qu'on fait glisser successivement de 1 point.

Pour les 7 premiers intervalles où on est sûr d'être en dehors de l'événement on calcule la valeur caractéristique de la distribution des valeurs de σ avant l'événement. Si on admet que cette population est constituée de variables aléatoires de distribution gaussienne on soit que la probabilité qu'une valeur σ soit supérieure $\sigma_1 = \sigma_m + 2.5*\Sigma$ est de 3% : autrement dit, si en progressant vers le début de l'événement on trouve une valeur $\sigma > \sigma_1$ on peut dire qu'on a une probabilité de 97% d'avoir un σ qui n'appartient pas à la population antérieure à l'événement. On adapte ce critère pour dire que l'on a détecté le début T_1 l'événement qu'on prend égal au temps fin de l'intervalle sur lequel on a calculé σ .

5.2- Seuil de sensibilité de l'analyseur IAP sur la détection des événements

Nous présentons dans ce paragraphe une étude statistique des caractéristiques de l'ionosphère supérieure observée par DEMETER dans les zones de latitude dans lesquelles se produisent les événements, c'est-à-dire entre les latitudes magnétiques de 15° et 40° . L'objectif de cette analyse était de s'assurer que la sensibilité de IAP, limitée à des densités $N(O^+)$ supérieures à $\sim 15\text{-}20$ ions/cm³, n'induit pas un biais systématique dans la détection des événements et dans les résultats statistiques.

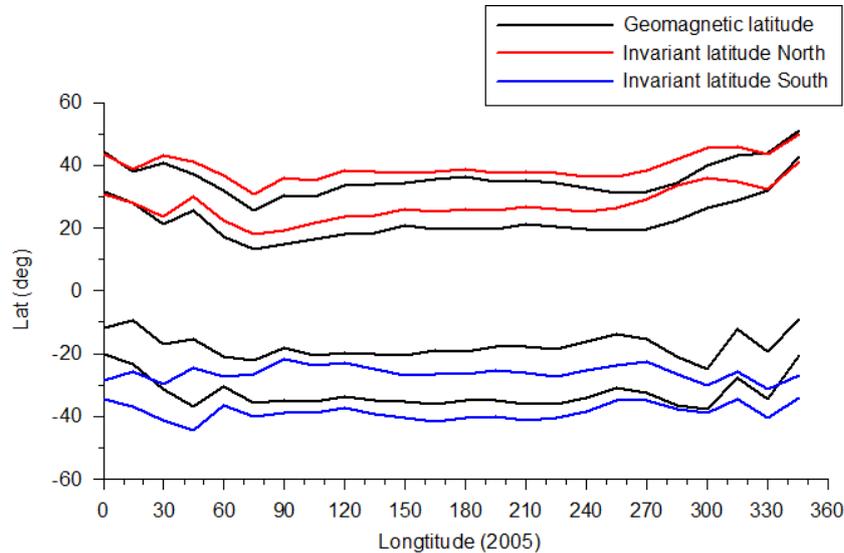


Figure 5.3. Intervalles de latitude utilisés pour l'étude de l'effet de l'ionosphère et du seuil de sensibilité de l'analyseur IAP.

Nous avons d'abord défini les positions moyennes des intervalles de latitude à l'intérieur desquels sont observés les événements en considérant les cas où 2 événements sont observés sur une même orbite, un dans le Nord, un dans le Sud. Les latitudes ont été calculées dans des

intervalles de 15° en longitude et la carte est représentée sur la *Figure 5.3* pour l'année 2005 en considérant les latitudes invariantes ou géomagnétiques.

5.2.1- Occurrence des évènements et densité moyenne $N(O^+)$

A partir de ces cartes on peut calculer, séparément pour les 2 hémisphères, la densité moyenne $N(O^+)$ en fonction de la longitude en distinguant 3 situations : (i) toutes les orbites, (ii) orbites avec évènements et (iii) orbites sans évènements. On donne dans les *Figures 5.4a* et *b*, deux exemples de résultats pour janvier et juin 2009.

En janvier 2009, la concentration $N(O^+)$ est légèrement supérieure pour les situations avec évènement, surtout dans l'hémisphère Nord (hiver local), en juin, les 3 courbes sont identiques pour l'hémisphère Nord mais dans le Sud (hiver local) $N(O^+)$ est régulièrement plus élevée en présence d'évènements. On observe donc une tendance de $N(O^+)$ à être plus élevée en présence d'évènements dans l'hémisphère d'hiver local.

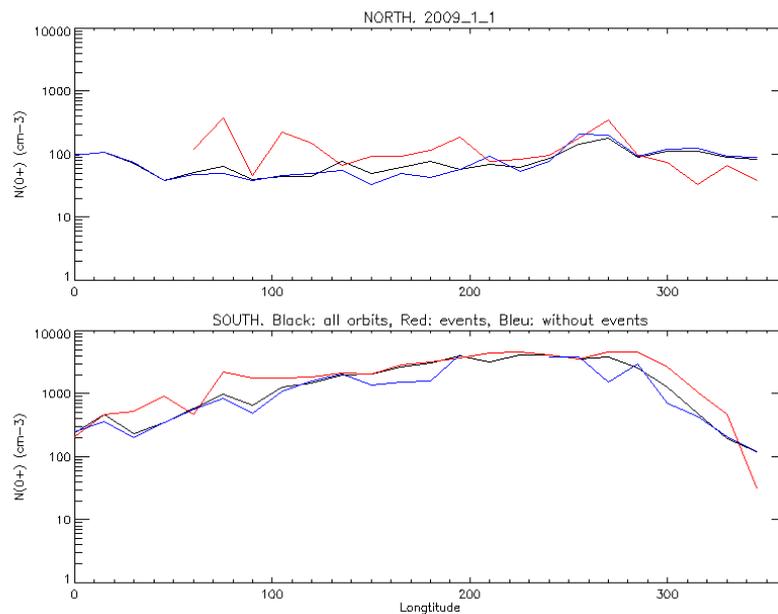


Figure 5.4.a. Variations en longitude des densités moyennes $N(O^+)$, janvier 2009

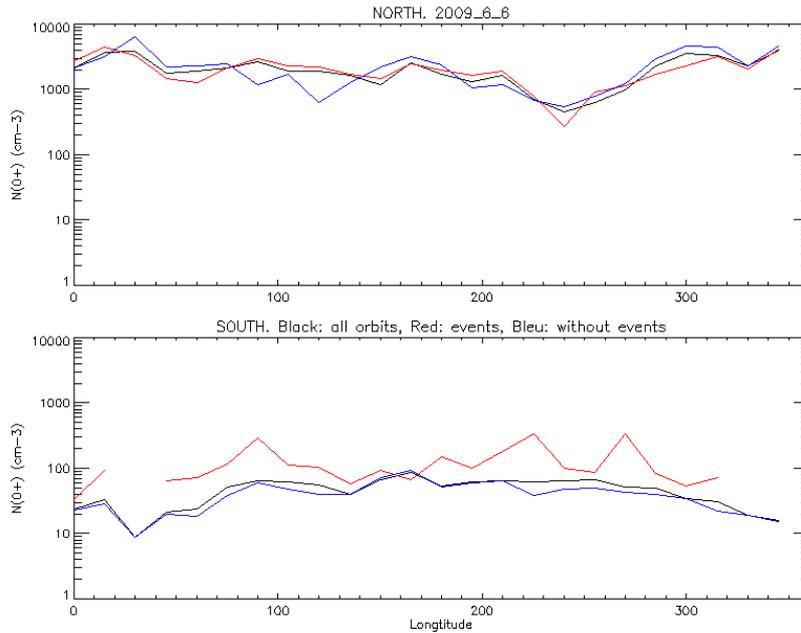


Figure 5.4b. Variations en longitude des densités moyennes $N(O^+)$, juin 2009.

5.2.2 – Recherche d'un éventuel biais induit par le seuil de mesure de IAP

L'analyseur APR de l'instrument IAP a un seuil de sensibilité qui se situe entre 10 et 20 ions/cm³ pour $N(O^+)$ ce qui empêche la détection des événements C lorsque $N(O^+)$ est inférieure à cette valeur. L'analyse des valeurs moyennes de $N(O^+)$ montre que la densité moyenne est en général largement supérieure à ce seuil sauf dans l'hémisphère Sud en hiver local et pour un secteur de $\sim 100^\circ$ de longitude centré autour de la longitude 0° . On s'est néanmoins interrogé sur un biais éventuel que pourrait induire sur les résultats statistiques le seuil de sensibilité des mesures dans le cas où un événement apparaîtrait alors que la concentration $N(O^+)$ est faible.

La méthode que nous avons employée a été la suivante : sur chaque orbite (i), dans les zones de latitude définies sur la Figure 5.3 et pour chaque hémisphère séparément, on a déterminé le nombre N1 de points pour lesquels $N(O^+) < 30 \text{ ions/cm}^3$ et le nombre N2 de points total dans l'intervalle de latitude. En distinguant les 3 situations suivantes : « orbites avec événement », « orbites sans événement » et « toutes les orbites », on calcule pour chaque orbite les rapports $R(i)=N1/N2$ pour le Nord et pour le Sud séparément en notant la valeur de l'indice magnétique, A_m , pour l'orbite. Pour chaque année et chaque classe d'activité on obtient finalement les moyennes statistiques R_m de tous ces rapports en calculant leur valeur moyenne ramenée au nombre total d'orbites dans la classe d'activité considérée.

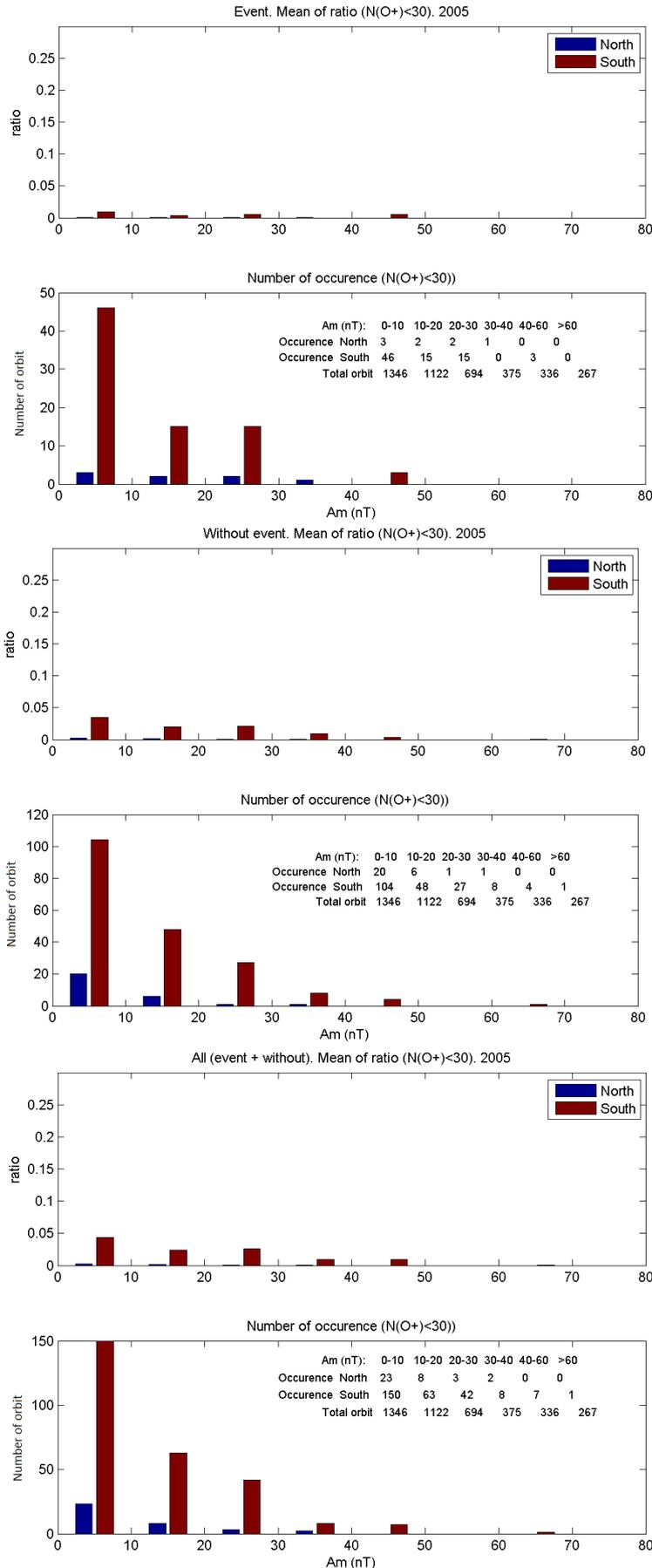


Figure 5.5.a. Orbites avec évènement C: pour chaque hémisphère et chaque classe d'activité, moyennes statistiques R_m (panneau supérieur) et nombre d'orbites N où $N(O^+)$ est inférieur à 30 ions/cm³ au moins 1 fois (panneau inférieur).

Figure 5.5b. Orbites sans évènement C: pour chaque hémisphère et chaque classe d'activité, moyennes statistiques R_m (panneau supérieur) et nombre d'orbites N où $N(O^+)$ est inférieur à 30 ions/cm³ au moins 1 fois (panneau inférieur).

Figure 5.5c. Toutes les orbites: pour chaque hémisphère et chaque classe d'activité, moyennes statistiques R_m (panneau supérieur) et nombre d'orbites N où $N(O^+)$ est inférieur à 30 ions/cm³ au moins 1 fois (panneau inférieur).

De la même façon, on calcule [pour chaque année, pour les 3 situations et pour chaque classe d'activité], le nombre N' d'orbites où, en au moins 1 point de l'intervalle de latitude, $N(O^+) < 30 \text{ ions/cm}^3$. Les *Figures 5.5a-c* ci-dessous présentent les résultats pour l'année 2005, les résultats étant semblables pour toutes les autres années.

On constate que la distribution statistique des Rm et des nombres d'orbites, N' , est similaire pour l'ensemble des orbites, qu'il y ait ou non un événement dans la zone d'occurrence. On en conclut d'une part que la reconnaissance et la détection des événements de type C n'a pas été affectée par le seuil de mesure de IAP et d'autre part que l'occurrence des événements ne montre pas de variation associée à des densités $N(O^+)$ très faibles.

5.3 – Analyse spectrale des perturbations de la densité $N(O^+)$

5.3.1- Calcul des spectres et problèmes induits par la morphologie du signal

On calcule le spectre des perturbations en utilisant le signal

$$\delta = [N(O^+) - N_{fit}] / N_{fit} = \Delta N / N_{fit}$$

défini au paragraphe 5.1 qui mesure les perturbations normalisées. Le cas échéant, si on s'intéresse à l'amplitude de la perturbation elle-même, on peut appliquer le même calcul à ΔN . Le signal peut contenir des fluctuations de différentes périodes et amplitudes dont toutes ne seront pas présentes sur la durée totale de l'évènement. Le calcul du spectre du signal par FFT demande de prendre des précautions pour éliminer ou au moins diminuer les fréquences parasites (leakage) dues au fait que la période d'une oscillation n'est pas un sous-multiple de l'intervalle d'analyse (Brigham, 1974). La solution consiste à appliquer sur la série temporelle une fenêtre de type Hanning.

Pour améliorer la résolution en fréquence de la FFT, c'est-à-dire $1/T$ avec T durée de du signal analysé, nous avons allongé l'intervalle de calcul de 128s avant T_1 et après T_2 .

Lorsqu'il y a plusieurs oscillations de période, d'amplitude et de durée différentes une fréquence parasite autour de $F_D = 1/(T_2 - T_1)$ associée à la durée du signal, de T_1 à T_2 , peut apparaître.

Notre calcul suit les étapes suivantes:

(i) appliquer la FFT au signal $\delta' = \delta - \delta m$ corrigé de la valeur moyenne δm déterminée sur la durée de l'intervalle de calcul ; si on ne retire pas la valeur moyenne apparaît à la fréquence 0 une contribution correspondant à δm .

(ii) appliquer une méthode d'apodisation classique à δ' en choisissant la fenêtre de Hanning définie par les coefficients :

$$W_han(k) = 0.5 - 0.5*\cos(2 \pi k/ N), k = 0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

Le spectre est alors calculé sur les valeurs $d = \delta' * W_han$ et la puissance spectrale S_k à chaque fréquence f_k obtenue par

$$S_k = \Delta F*(a_k^2 + b_k^2)$$

Où a_k et b_k sont les parties réelle et imaginaire du spectre complexe à la fréquence f_k et $\Delta F=f_k-f_{k-1}$ la résolution du spectre définie $\Delta F=1/(T_2-T_1)$.

Les Figures 5.6a, b ci-dessous donnent des exemples de spectres pour les évènements détectés sur les orbites 26852.1 et 28992.1.

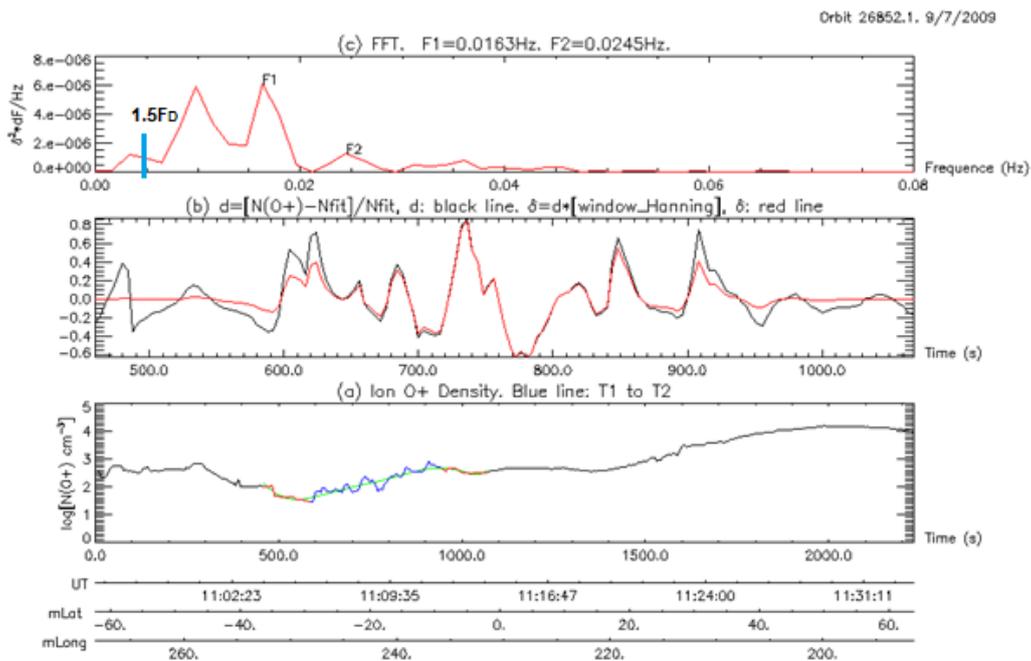


Figure 5.6.a- Panneau (a), profil de la densité $N(O^+)$, la durée effective de l'évènement entre T_1 et T_2 est indiquée en bleu sur le tracé, Panneau (b), profil des perturbations normalisées, Panneau (c), spectre.

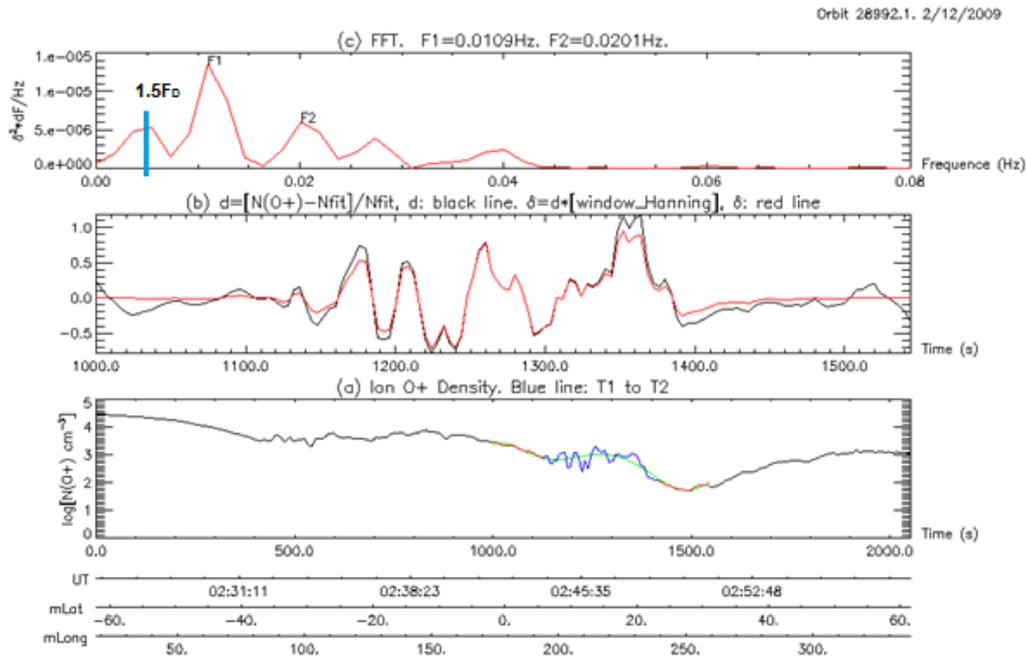


Figure 5.6.b- Panneau (a), profil de la densité $N(O^+)$, la durée effective de l'évènement entre T_1 et T_2 est indiquée en bleu sur le tracé, Panneau (b), profil des perturbations normalisées, Panneau (c), spectre.

5.3.2- Détermination des fréquences caractéristiques

A partir des spectres bruts il faut rechercher la fréquence du pic fondamental puis les fréquences des pics suivants qui peuvent être des harmoniques, être liées au problème de « fuite » à partir des fréquences principales, ou simplement traduire la complexité du spectre des perturbations sans qu'il y ait de relation simple entre les fréquences correspondantes. Pour les raisons qui viennent d'être exposées, on élimine toute la partie basse du spectre correspondant aux fréquences $< 1.5 * F_D$ et de recherche les fréquences pour lesquelles la puissance est un maximum local suffisamment prononcé. Cette méthode permet aussi de caractériser par une gaussienne la forme des pics au voisinage de ces fréquences lorsque les pics s'étendent sur au minimum 4 fréquences. On obtient alors une détermination plus précise de la vraie fréquence au sommet du pic, la largeur de celui-ci ainsi que la puissance totale intégrée sur tout le pic.

Les deux *Figures 5.7* montrent les spectres et les pics qui ont été déterminés par cette méthode pour 2 orbites successives 28992.1 et 28993.1. On remarquera des pics parasites situés à des fréquences inférieures à $1.5 F_D$ donc bien éliminés par notre méthode de traitement et, de toute façon, de faible amplitude, ce qui montre l'efficacité du

conditionnement du signal préalable au calcul du spectre. On voit que la méthode détermine correctement les différents pics significatifs et les indications en couleur montrent les estimations plus précises obtenues par l'assimilation des pics à des gaussiennes.

Ces 2 exemples sont intéressants à plusieurs titres : il s'agit de 2 orbites successives, un évènement étant détecté dans le Nord sur la première, le second dans le Sud pour la suivante 28993.1, les perturbations apparaissant dans les 2 cas sous la forme de trains d'ondes assez longs.

Dans le premier cas les oscillations sont plus irrégulières, ce qui est le cas des évènements présentant des morphologies similaires. Le spectre est complexe avec 4 pics significatifs, semblable à nombre de spectres observés qui montrent la présence de 3 pics ou plus. Les fréquences supérieures ne correspondent pas exactement aux harmoniques de la fréquence fondamentale $F_1=0.0113$ Hz mais on pourra remarquer que la fréquence moyenne $(F_2+F_3)/2$ de 0.0237 Hz est très voisine de $2.F_1$ et que la fréquence F_4 est aussi voisine de $3.F_1$. Un calcul des moyennes pondérées en prenant en compte notamment l'étalement du pic #4 donne des résultats encore plus proches d'une séquence de 3 harmoniques. Lorsqu'on voit l'amplitude des perturbations il est tentant de penser à l'existence d'effets non linéaires et à la génération d'harmoniques. Des constatations semblables ont été faites sur plusieurs autres évènements du même type. Faute de temps nous n'avons pas poussé plus loin les investigations qui demandent des méthodes plus sophistiquées de traitement du signal (méthodes par ondelettes) et surtout un travail concernant la physique de la source des phénomènes, ce qui dépassait les objectifs de la thèse. Ceci constitue certainement une voie à explorer dans le futur.

Le spectre obtenu pour la seconde orbite est totalement différent avec un seul pic étroit parfaitement résolu, ce qui est compréhensible étant donné la morphologie exceptionnelle des perturbations sous la forme d'un train d'ondes de longue durée et très régulier. On notera que ces 2 évènements si différents se produisent à quelques heures d'intervalle et dans des régions de latitudes magnétiques conjuguées simplement décalées de $\sim 20^\circ$ en longitude.

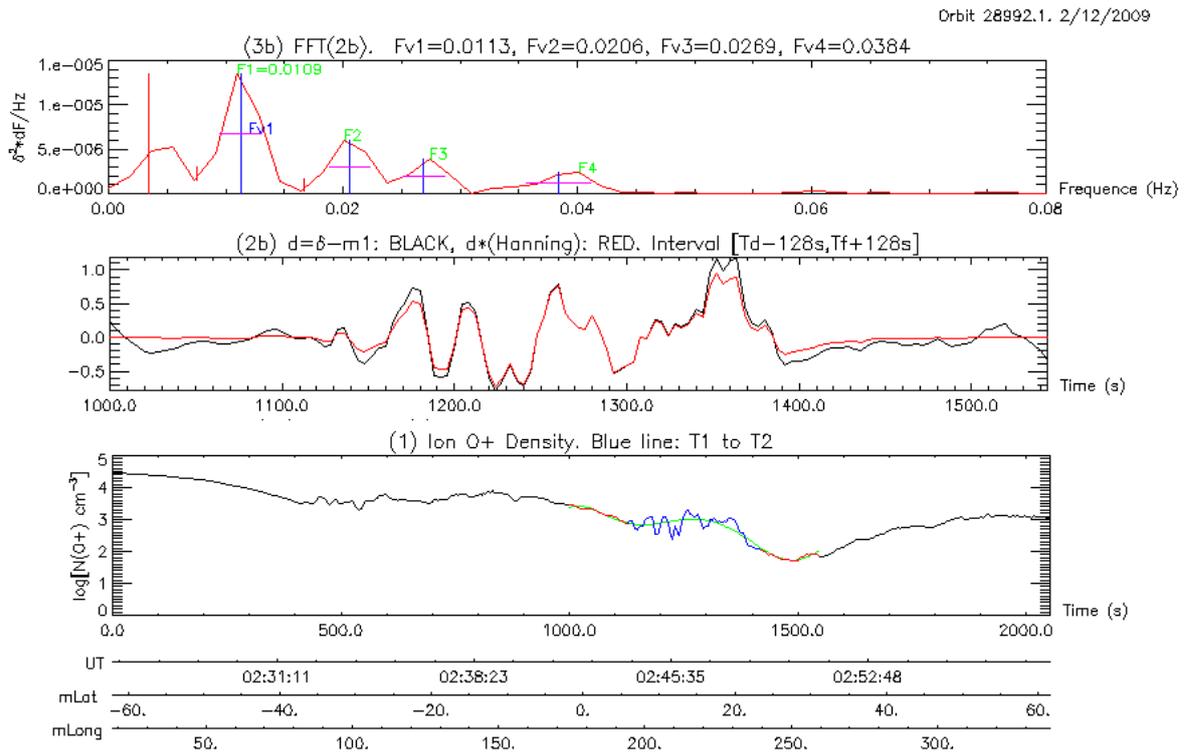


Figure 5.7.a. Orbite 28992.1, détermination précise des caractéristiques des pics du spectre.

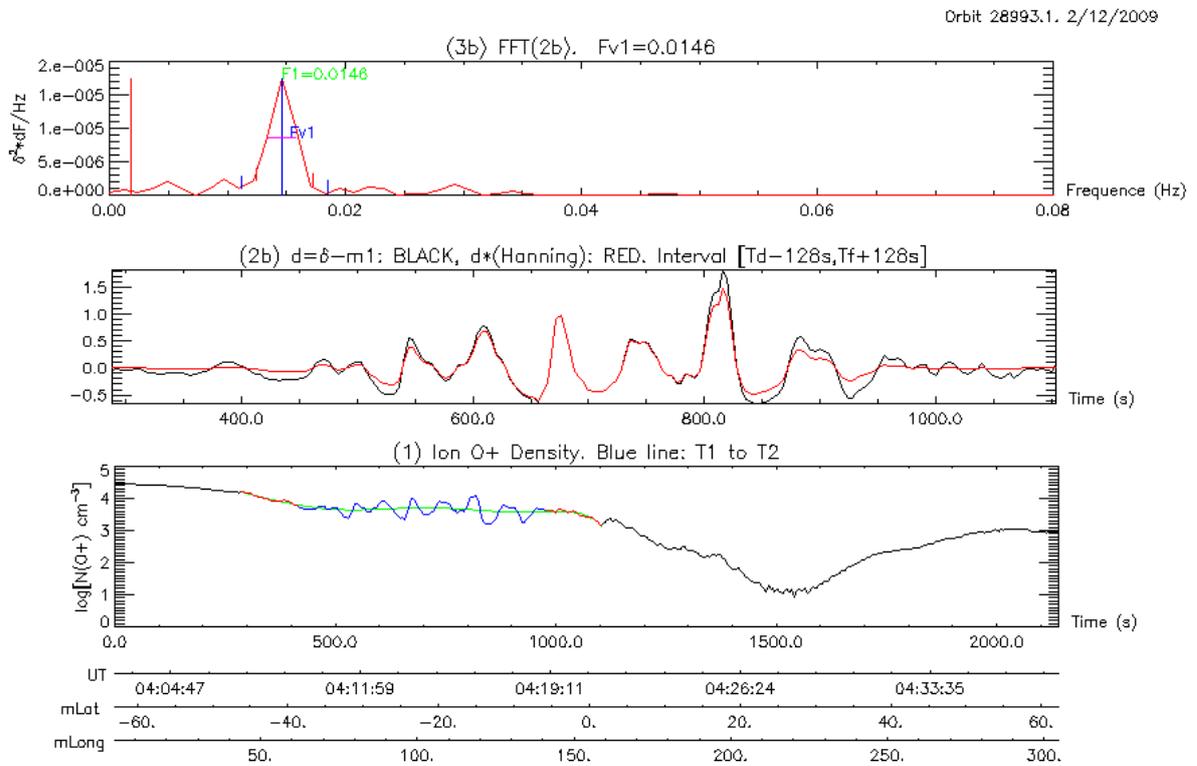


Figure 5.7.b. Orbite 28993.1, détermination précise des caractéristiques des pics du spectre.

5.3.3- Analyse statistique des fréquences fondamentales des perturbations

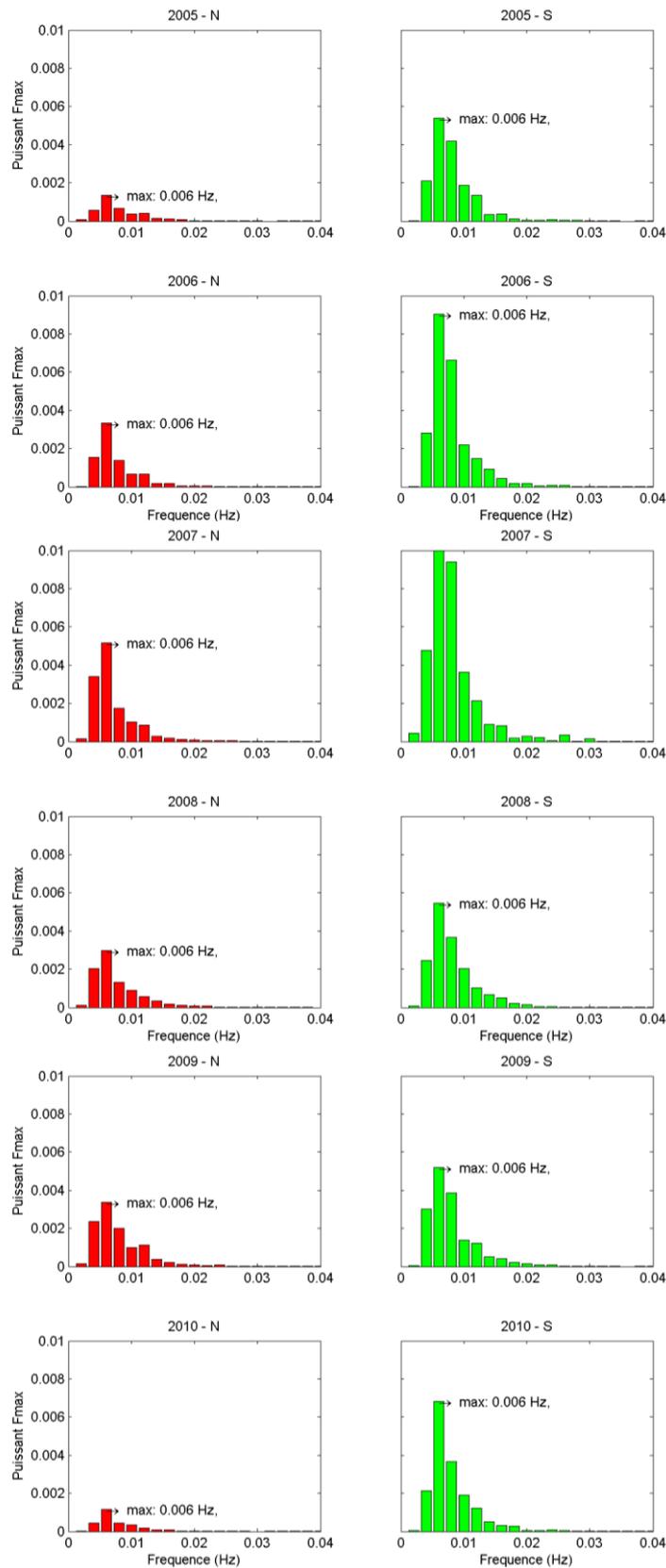


Figure 5.8. Histogrammes des fréquences fondamentales des spectres des perturbations

Nous avons étudié la distribution des fréquences fondamentales au cours des 6 années d'observations et les résultats sont présentés sur la *Figure 5.8* sous la forme d'histogrammes des puissances en fonction des fréquences, tracés indépendamment pour les événements Nord et Sud. On remarque la prédominance de fréquences voisines de 0.006 Hz qui sont observées dans les deux hémisphères et pour toutes les années. Cette bande de fréquence est caractéristique des événements que nous avons qualifiés « d'impulsionnels », avec une ou deux augmentations irrégulières de $N(O^+)$ mais pas de trains d'onde plus ou moins réguliers comme dans les cas présentés ci-dessus, ces événements «impulsionnels» sont les plus couramment observés et surtout ceux qui correspondent généralement à des perturbations de très forte amplitude. La queue des spectres, au delà de ~ 0.01 Hz est le fait d'événements avec des oscillations de plus longue durée.

5.4 – Régions et fréquences d'occurrence

On a représenté sur les *Figures 5.9.a-f* pour 6 ans d'observations de DEMETER (2005-2010) la trace au sol des parties des orbites sur lesquelles un événement de type C a été observé.

De ces figures se dégagent qualitativement les observations suivantes :

1. Les régions d'occurrence s'organisent autour de l'équateur magnétique, dans des intervalles de latitude dont l'extension est de l'ordre de $\sim 30^\circ$, dans l'hémisphère Sud, un peu moins dans l'hémisphère Nord.
2. Il y a une forte dissymétrie en longitude avec un maximum d'occurrence dans les secteurs des océans Indien et Pacifique et un minimum dans le secteur de l'Atlantique Sud et de l'Afrique.
3. Dans le secteur de longitude s'étendant de l'Amérique du Sud à l'Inde, les événements sont pratiquement absents aux latitudes magnétiques inférieures à $\sim 5-10^\circ$, c'est-à-dire ne se produisent pas au niveau de l'équateur magnétique. Au contraire, dans les autres secteurs de longitude, une proportion significative d'événements est observée aux très basses latitudes. Ceci est particulièrement vrai pour les 3 années 2007 à 2009.
4. Les événements sont plus fréquents dans les années 2008 et 2009 que dans les années 2005 et 2010. La période 2008-2009 est appelée par les physiciens solaires 'The Deep solar minimum'.

Les paragraphes et figures suivantes précisent ces différents points

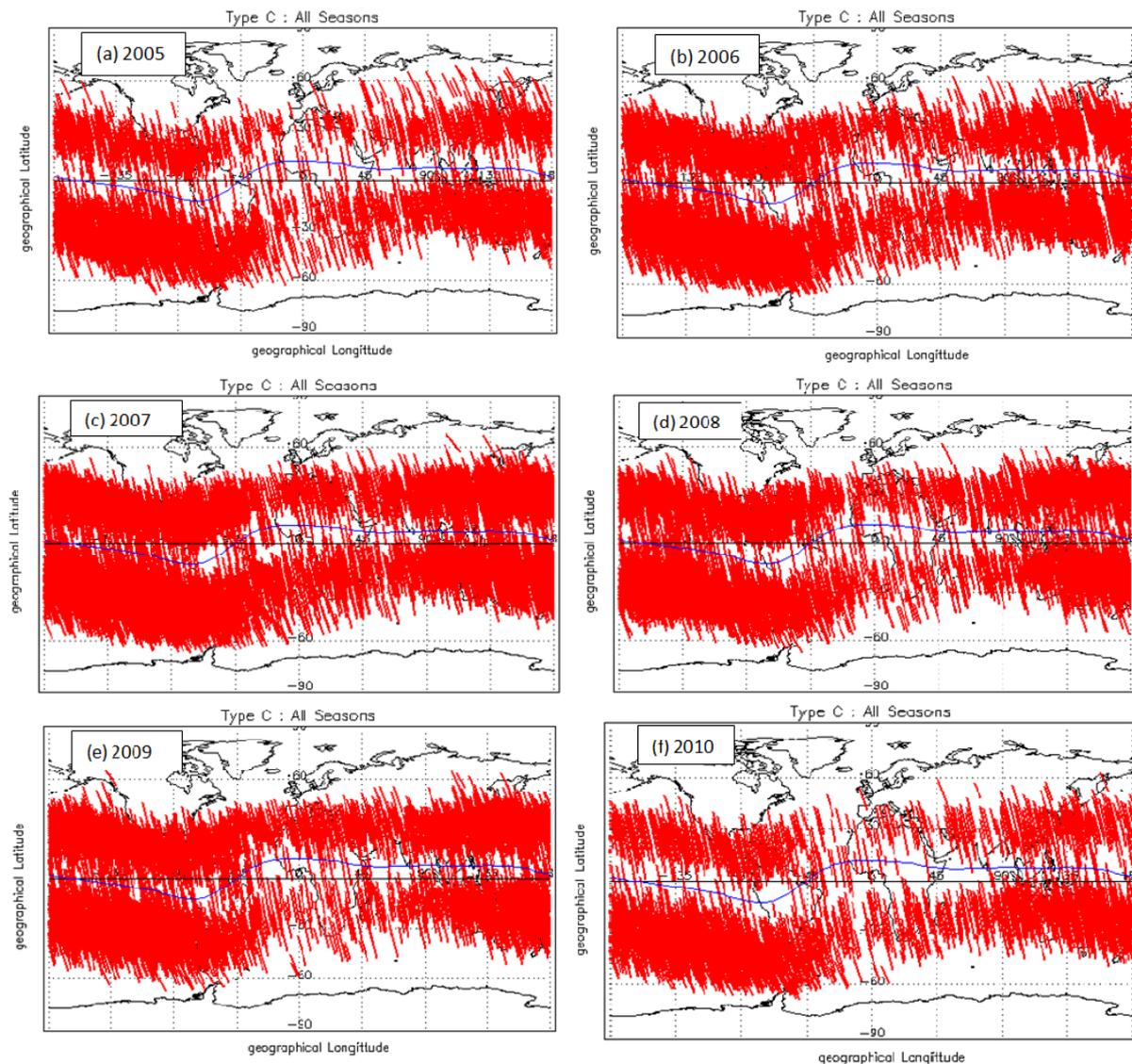


Figure 5.9.a-f. Traces de l'orbite pendant les intervalles de temps où un évènement est détecté pour 6 ans d'observations de DEMETER (2005-2010). En bleu la trace de l'équateur magnétique

Les Figures 5.10.a-f précisent la répartition géographique des évènements en donnant la probabilité d'occurrence $p(L,l)$ en fonction de la longitude L et de la latitude l . Cette probabilité est définie pour des pixels de 10° en longitude et de 5° en latitude. On calcule le nombre total, $Norb(L,l)$, d'orbites DEMETER traversant le pixel (L,l) et le nombre $NC(L,l)$ d'orbites traversant le pixel avec un évènement de type C. La probabilité d'occurrence est définie par $p(L,l)=NC(L,l)/Norb(L,l)$. Ce calcul est fait pour chaque mois des années 2005 à 2010 mais nous avons représenté sur les Figures 5.10 la probabilité moyenne pour chaque année.

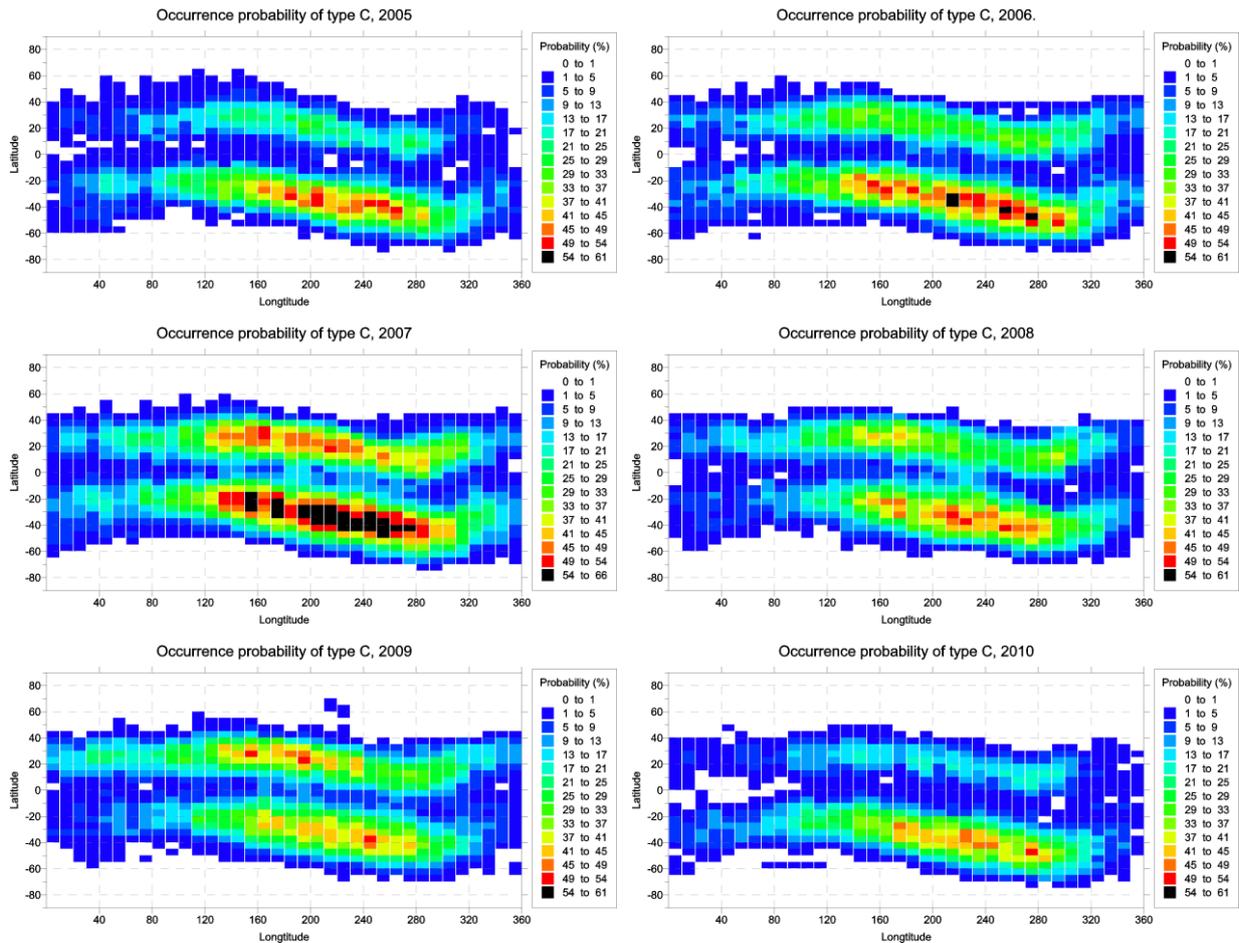


Figure 5.10. Cartes annuelles des probabilités d'occurrence des évènements de type C

La figure 5.10 montre en général une fréquence d'occurrence plus forte dans l'hémisphère sud sauf pour l'année 2009 qui est l'année du minimum d'activité magnétique. Pendant les années 2005 et 2010, la fréquence d'occurrence est particulièrement faible dans l'hémisphère Nord et c'est au cours de l'année 2007 que l'on observe le plus d'évènements dans l'hémisphère Sud.

La remarque indiquée au point 3 ci-dessus nous a conduit à analyser plus en détail l'ensemble des évènements recensés en distinguant 2 classes d'évènements: (A) ceux qui ne s'étendent que dans un seul hémisphère, Nord ou Sud, (B) ceux qui s'étendent dans les 2 hémisphères et traversent donc l'équateur magnétique. Chaque classe a été divisée en 2 sous-classes : la première en distinguant les évènements « CN » qui se produisent dans le Nord et les évènements « CS » qui se produisent dans le Sud, la seconde en distinguant les évènements qui traversent l'équateur magnétique mais qui l'étendent davantage, « CEN », et ceux qui l'étendent davantage dans le Sud, « CES ». Les évènements « équatoriaux » CEN et CES ne constituent qu'une faible proportion de l'ensemble des évènements, inférieure en

général à 10% quelle que soit la longitude. Ce sont probablement de tels évènements qu'ont détecté *Miller et al.* (2014) et, comme l'ont suggéré *Sardul et al.* (1977), ils pourraient constituer un « initiateur » à l'origine de la formation des bulles de plasma.

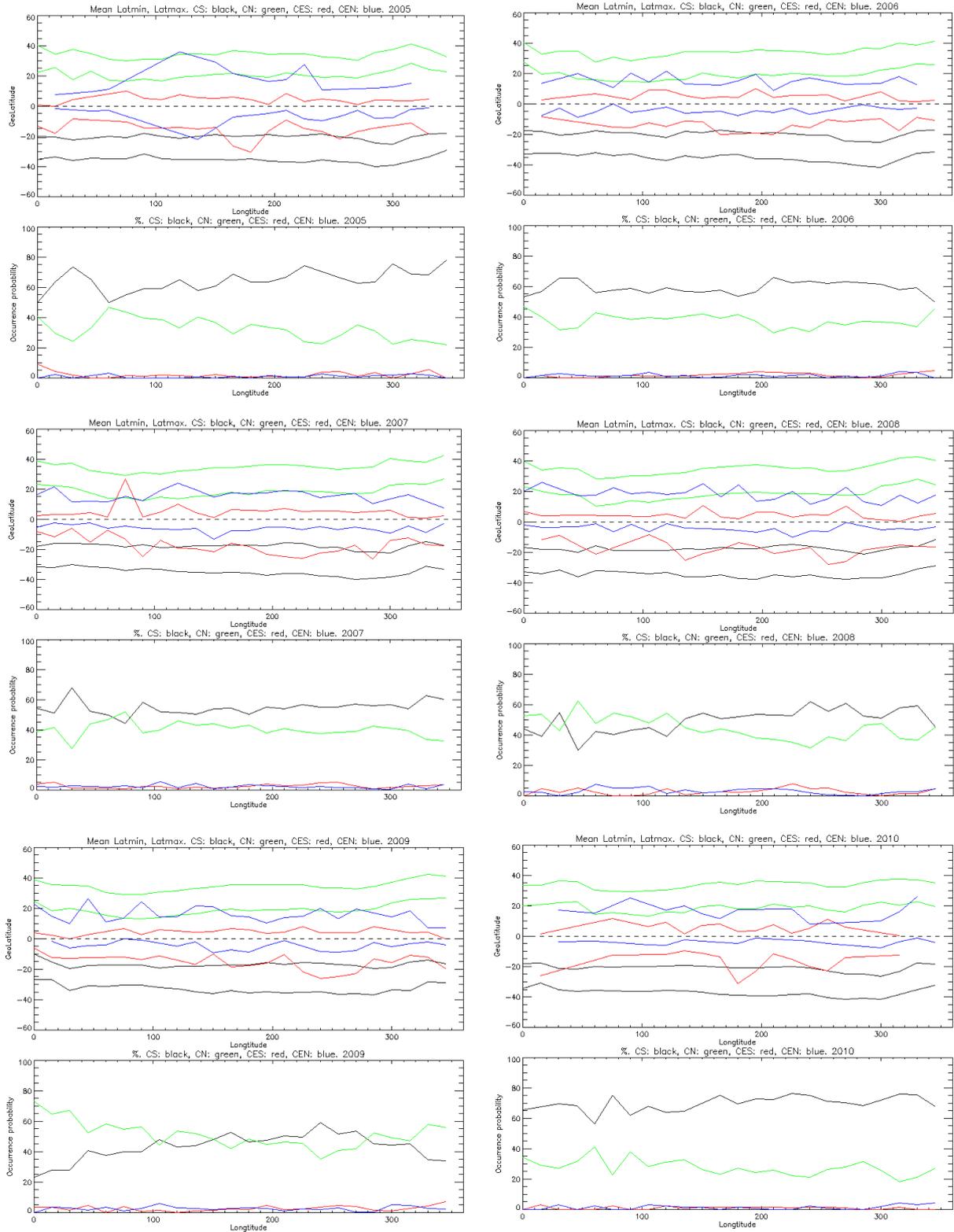


Figure 5.11. Zones d'occurrence des différentes classes d'évènements

Les évènements « hémisphériques » CS et CN représentent plus de 90% de l'ensemble des évènements. Les CS sont majoritaires en 2005, 2006 et 2007 mais au cours de ces années le rapport [CS/CN] diminue régulièrement de 1.8 à 1.35 essentiellement parce que le nombre de CS diminue. Au cours des années 2008 et 2009 le rapport [CS/CN] est égal à 1.1 et 0.9 respectivement, c'est-à-dire que pendant le minimum d'activité solaire et magnétique très profond de 2009, on observe un nombre un peu plus important d'évènements dans l'hémisphère Nord principalement parce que la fréquence d'occurrence des évènements du Sud diminue fortement dans le secteur de l'océan Atlantique, de l'Afrique et de la partie Ouest de l'océan Indien. Enfin, en 2010, début du cycle solaire 24, le rapport [CS/CN] reprend une valeur forte, 2.3 supérieure à celle des années de la fin du cycle 23, mais cette augmentation est due en partie à l'absence de données en décembre 2010, hiver nord où les évènements CN sont plus nombreux.

Les *Figures 5.11* donnent une vue détaillée, en fonction de la longitude, des intervalles de latitude dans lesquels se produisent les 4 types d'évènements.

On constate que pour l'année 2005, les évènements de type CEN (courbes bleues), dans le secteur de longitude autour de 100° ont une extension en latitude très importante comparée aux autres années.

5.5 – Variations saisonnières, inter-annuelles et influence de l'activité solaire

5.5.1- Variations saisonnières

La *Figure 5.12* présente, pour chacune des années de 2005 à 2010, la variation saisonnière de la probabilité d'occurrence des évènements dans chacun des hémisphères Nord et Sud où ils sont observés. Il faut noter que pour l'année 2010 on ne dispose que de très peu de données en Décembre puisque DEMETER a été arrêté le 9. Ceci implique aussi que la période du solstice d'hiver (Nord) 2010 qu'on a assimilé dans cette étude à l'intervalle Novembre-Février n'est pas statistiquement représentative, de même que le solstice d'hiver 2004-2005 puisque nous n'avons pas traité l'année 2004. Les 2 tracés inférieurs rassemblent ces courbes pour montrer, comme le laissait présager l'ensemble des observations, que les évènements sont plus fréquents au Sud qu'au Nord avec des probabilités moyennes d'occurrence respectivement de $\sim 45\%$ et de $\sim 30\%$ environ.

Les tracés ne révèlent pas de variations saisonnières uniformes sur l'ensemble de la période mais semblent indiquer des effets qui dépendent de la position de l'année dans le

cycle solaire, c'est-à-dire de l'activité solaire et/ou magnétique pendant l'année considérée puisqu'elles sont liées.

- Pour les années 2005, 2006 (phase déclinante du cycle solaire 23) et 2010 (début du cycle 24) caractérisées par une activité magnétique moyenne et modérée, on observe clairement pour les évènements du Sud un maximum d'occurrence prononcé pendant l'hiver local (juin-août) et un maximum secondaire moins net en été local (novembre-février). Dans le Nord, les évènements sont moins nombreux et suivent sensiblement la même variation saisonnière en 2006 et 2010, un peu moins clairement en 2005 car le maximum d'été local (juin-août) est moins prononcé.

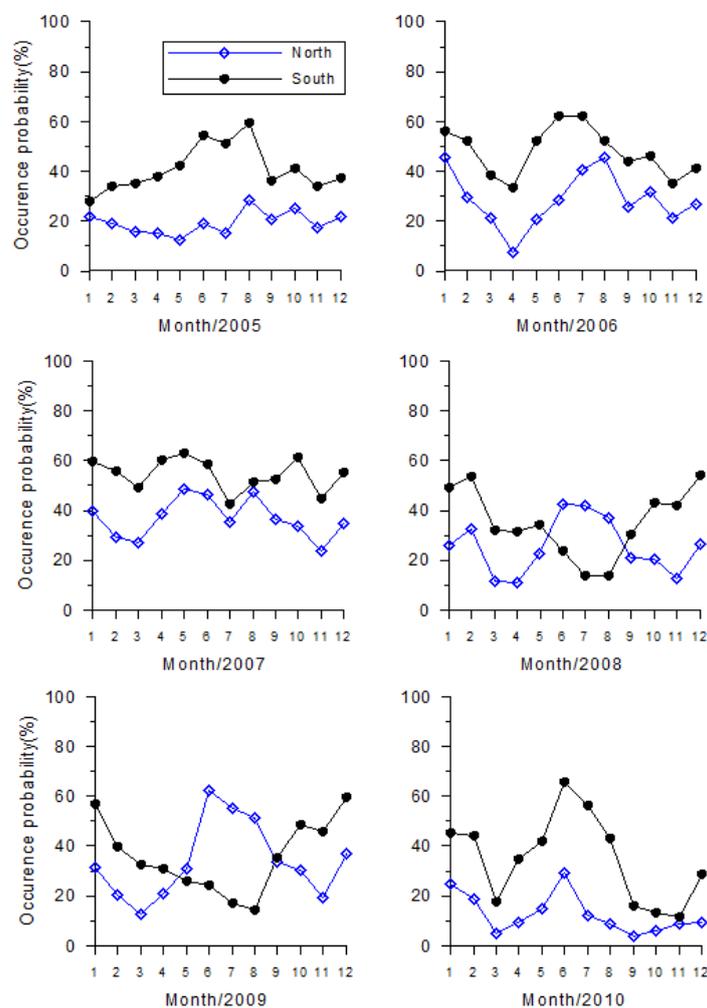


Figure 5.12. Variations saisonnières de la probabilité d'occurrence des évènements de type C

- Pour les années 2008 et 2009 qui correspondent au dernier minimum solaire très accentué, les évènements présentent des variations inversées dans les 2 hémisphères: au Sud, un minimum en hiver local (juin-août) et un maximum en été local (novembre-février), au Nord

un maximum clair en été local (juin-août) et un maximum secondaire moins prononcé en hiver local (novembre-février).

- L'année 2007 est la période pendant laquelle la probabilité moyenne d'occurrence des événements est la plus grande, de l'ordre de 50% au Sud avec un maximum à 64% un peu après l'équinoxe de printemps (avril-mai) et 40% au Nord avec un maximum de ~ 50% également en avril-mai. Année 2007, qui ne montre aucune des caractéristiques des années 2005-2006-2010 et 2008-2009, semble être une année de transition entre les 2 régimes précédents. On peut distinguer des maxima d'occurrence aux équinoxes comme si l'amplitude des maxima des solstices observés dans les 2 autres régimes évoluait au cours de cette année de transition.

5.5.2- Variations interannuelles

Nous avons partiellement décrit ces variations dans le paragraphe précédent en montrant les comportements différents de 3 groupes d'années (2005-2006 ; 2008-2009 ; 2007) suivant leur position par rapport au cycle solaire. D'une façon générale, les événements sont toujours plus fréquents au Sud quelle que soit la saison, à l'exception des 2 années de minimum d'activité solaire 2008-2009 où les événements sont plus nombreux au Nord qu'au Sud dans la période encadrant le solstice d'été (Nord) entre mai et août.

5.5.3- Influence de l'activité solaire

Le *Tableau 5.2* présente une vue très complète de l'évolution de l'activité solaire (indices SSN et F10.7) et magnétique globale (indices Aa) pour les années 2005-2010 ainsi que les probabilités d'occurrence des événements moyennées sur chaque année et, de façon plus détaillée, moyennées sur les périodes des solstices et des équinoxes qui montrent, suivant les années, des effets saisonniers caractéristiques.

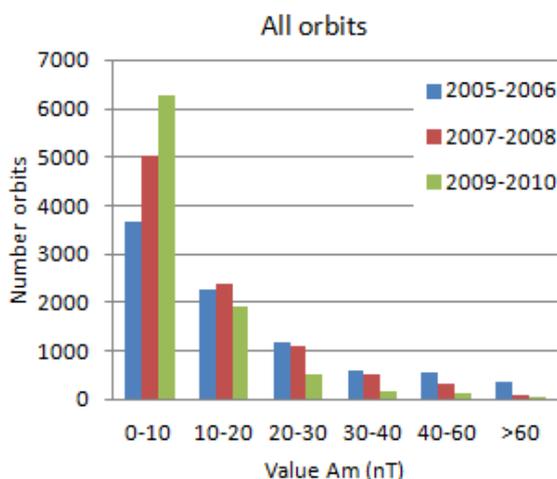
La variation de l'activité solaire entre 2005 et le minimum très prononcé de 2008-2009 ne semble pas avoir d'incidence significative sur la probabilité d'occurrence globale ni sur les probabilités d'occurrence calculées pour les équinoxes et les solstices.

Year		2005				2006				2007				2008				2009				2010			
Solar Activity (SSN)		29.8				15.2				7.5				2.9				3.1				16.5			
Solar Activity (F10.7 cm)		92.3				80				73.1				68.7				70.5				80			
Aa index (nT)		23				16				15				14				8				12			
Total orbits		4135				4518				4192				4566				4746				4287			
Orbits with event	All	1924				2542				3165				2179				2541				1715			
	North	784				1281				1822				1169				1570				563			
	South	1691				2159				2675				1586				1707				1527			
Occurrence Probability (%)	All	46.5				56.3				64.4				47.7				53.5				40			
	North	19.0				28.4				37.1				25.6				33.1				13.1			
	South	40.9				47.8				54.5				34.7				36.0				35.6			
Equinox		MA	MJJA	SO	NDJF	MA	MJJA	SO	ND																
Solar Activity (SSN)		24.4	39.6	15.3	19.8	20.4	15.3	12.5	15.6	4	9.9	1.7	4.3	6.1	2	2	1.9	0.8	3	4.6	11.7	11.7	14.5	24.4	18
Solar Activity (F10.7 cm)		87.8	97.7	84.1	82	82.2	80.4	76.2	80.7	72.2	74.2	67.5	71.4	71.5	68.4	67.8	67.5	69.5	70.6	71.5	76.9	79.5	78.5	81.6	81.2
Total orbits		684	1520	505	1333	789	1587	697	1571	791	1711	837	1576	804	1575	737	1488	826	1577	675	1693	878	1465	632	474
Orbits with event	All	276	850	222	693	312	1084	356	869	479	1217	537	872	284	769	338	787	325	918	368	920	247	834	112	106
	North	105	285	111	376	112	537	196	463	262	762	294	460	90	557	152	353	137	766	215	425	63	242	32	43
	South	248	783	190	592	283	907	312	753	434	917	478	797	255	334	266	727	261	313	288	827	227	759	90	76
Occurrence Probability (%)	All	40.4	55.9	44	52	39.5	68.3	51.1	55.3	60.6	71.1	64.2	55.3	35.3	48.8	45.9	52.9	39.3	58.2	54.5	54.3	28.1	56.9	17.7	22.4
	North	15.4	18.8	22.0	28.2	14.2	33.8	28.1	29.5	33.1	44.5	35.1	29.2	11.2	35.4	20.6	23.7	16.6	48.6	31.9	25.1	7.2	16.5	5.1	9.1
	South	36.3	51.5	37.6	44.4	35.9	57.2	44.8	47.9	54.9	53.6	57.1	50.6	317	21.2	36.1	48.9	31.6	19.8	42.7	48.8	25.9	51.8	14.2	16.0

Tableau 5.2.– Etude statistique de la variation de la probabilité d'occurrence en fonction du niveau d'activité solaire

5.6- Influence de l'activité magnétique

Les résultats obtenus pour l'étude statistique de l'influence de l'activité magnétique sont présentés dans les *Tableaux 5.3 et 5.4a,b,c*. Celle-ci a été caractérisée en utilisant l'indice Am qui définit l'activité magnétique sur des intervalles tri-horaires. Pour chaque évènement on a pris comme intervalle tri-horaire correspondant celui dans lequel se situe le début de l'évènement (temps T_1). Puisque l'indice Am définit l'activité magnétique globale, sans distinction d'hémisphère, cette étude a été faite sans distinguer les évènements selon l'hémisphère dans lequel ils sont détectés. Comme cela se fait couramment pour ce type d'analyse et pour améliorer la statistique pour les activités fortes peu fréquentes, on a rassemblé les observations dans 6 classes d'activité magnétique définies par les valeurs de Am comprises dans les intervalles 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, >60. Ces classes d'activité sont celle utilisées par Legrand et Simon (1989) dans leur étude sur les relations entre l'activité solaire et l'activité géomagnétique. Le *Tableau 5.3* montre la répartition du nombre d'orbites dans ces différentes classes par période de 2 ans, la signification statistique des 3 dernières classes étant dégradée en 2009 en raison de l'activité très faible enregistrée au cours de cette année.



Am (nT)	2005-2006	2007-2008	2009-2010
0-10	3666	5044	6264
10-20	2260	2388	1901
20-30	1194	1102	529
30-40	615	508	165
40-60	558	343	113
>60	355	94	61

Tableau 5.3- Répartition statistique des orbites de DEMETER en fonction du niveau d'activité magnétique

Le *Tableau 5.4a* qui donne le nombre d'évènements permet de juger de la signification statistique des probabilités indiquées dans les *Tableaux 5.4b et 5.4c*.

AM (nT)	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	Total orbits	Orbit with events										
0-10	1350	703	2316	1381	2613	1716	2431	1210	3550	1963	2714	1119
10-20	1124	563	1136	686	1220	809	1168	579	893	436	1008	418
20-30	686	333	508	264	557	362	545	252	211	102	318	107
30-40	374	126	241	99	278	144	230	78	65	26	100	38
40-60	336	115	222	85	191	111	152	49	20	10	93	25
>60	264	84	91	27	53	22	41	11	7	3	54	8

Tableau 5.4a- Etude Statistique de l'influence de l'activité magnétique, nombre d'évènements

AM (nT)	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	Total orbits	Orbit with events										
0-10	1350	52	2316	60	2613	65	2431	50	3550	55	2714	41
10-20	1124	50	1136	60	1220	66	1168	50	893	49	1008	41
20-30	686	48	508	52	557	65	545	46	211	48	318	33
30-40	374	33	241	41	278	52	230	34	65	40	100	38
40-60	336	34	222	38	191	58	152	32	20	50	93	27
>60	264	32	91	30	53	41	41	27	7	43	54	15

Tableau 5.4b- Etude Statistique de l'influence de l'activité magnétique, occurrence (%)

AM (nT)	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	Total orbits	Orbit with events										
0-10	32.65	36.54	51.3	54.33	53.2	54.24	53.22	55.53	74.8	77.29	63.3	65.25
10-20	27.19	29.26	25.17	26.98	24.8	25.57	25.57	26.57	18.81	17.17	23.5	24.37
20-30	16.59	17.31	11.25	10.38	11.33	11.44	11.93	11.56	4.44	4	7.41	6.24
30-40	9	6.55	5.33	3.89	5.66	4.55	5	3.58	1.37	1	2.33	2.21
40-60	8.13	5.98	4.92	3.34	3.89	3.51	3.32	2.25	0.42	0.4	2.17	1.46
>60	6.38	4.36	2	1	1	0.7	0.9	0.5	0.15	0.1	1.26	0.47

Tableau 5.4c- Etude Statistique de l'influence de l'activité magnétique, distribution (%) du nombre total d'orbites et du nombre d'orbites avec évènement dans chaque classe d'activité.

On constate dans le Tableau 5.4.c une bonne homogénéité dans les distributions du nombre total d'orbites et des orbites avec évènements, ce qui indique que, sur le plan statistique, les

résultats sont satisfaisants. Le *Tableau 5.4b* montre que, quelle que soit l'année considérée, la probabilité d'occurrence est maximum pour les périodes calmes (A_m entre 0 et 10), demeure à un niveau semblable pour les 2 niveaux suivants d'activité (jusqu'à $A_m \sim 30$) pour chuter nettement pour les activités magnétiques modérées à fortes, les 3 dernières classes. Lorsqu'on compare les différentes années, on constate que les évènements se produisent préférentiellement dans les années de transition comme 2007 entre un Soleil actif et une activité magnétique soutenue (2005) et un Soleil calme et une activité magnétique très faible (2009). Au cours de l'année 2007, par exemple, la probabilité d'occurrence des évènements est en moyenne de 65% pour les 3 premières classes d'activité alors que les chiffres correspondants sont de l'ordre de 50% en 2005 (activités solaire et magnétique encore fortes pendant la phase déclinante du cycle 23) et de l'ordre de 40% en 2008-2009 (activités solaire et surtout magnétique très faibles pendant le minimum précédant le cycle 24 notamment en 2009).

La *Figure 5.13* montre, pour chaque année 2005 à 2010, la distribution du nombre d'orbites avec évènements, c'est-à-dire, pour chaque classe d'activité magnétique, le rapport [(nombre d'orbites avec évènements dans la classe)/(nombre total d'orbites avec évènements)]. Les évènements sont observés préférentiellement pour des niveaux faibles d'activité magnétique et cette tendance s'accroît pour les années calmes comme 2009.

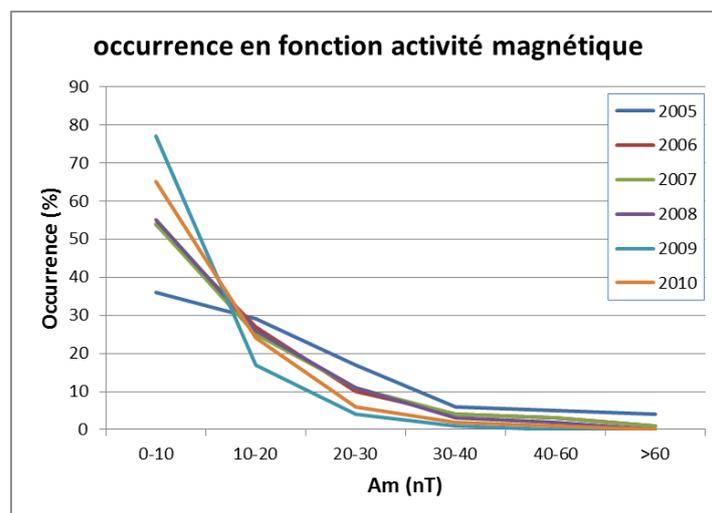


Figure 5. 13. Distributions annuelles de la probabilité d'occurrence en fonction de l'activité magnétique

Pour illustrer ces résultats statistiques nous présentons sur la *Figure 5.14* une étude de cas pour la période d'Avril 2010. Une éjection de masse coronale (CME) a atteint la terre le 5

Avril 2010 à 8.25 UT, provoquant un orage magnétique et un pic d'activité magnétique, A_m atteignant ~ 63 nT. Cette CME était suivie d'un jet de vent solaire rapide, dont l'impact sur la terre a été ressenti durant plusieurs jours, les 6, 7 et 8 avril. Cet événement a été décrit en détail par *Shimeis et al.* (2012) et *Fathy et al.* (2014). L'activité décroît ensuite pendant quelques jours pour revenir à un niveau faible ($A_m \sim 10$ nT) avec deux augmentations transitoires le 12 et le 14 suivies d'une période d'activité faible jusqu'au 20 Avril. On a indiqué sur la *Figure 5.14* les événements observés par DEMETER au Nord et au Sud et caractérisés par l'amplitude des oscillations de $N(O^+)$ (notée en terme de puissance sur la figure, voir paragraphe sur l'analyse spectrale des oscillations). Outre la prédominance manifeste des événements qui se produisent au Sud, on constate que les événements se produisent préférentiellement lorsque l'activité est faible et sont pratiquement absents ou de très faible intensité lors des pics d'activité.

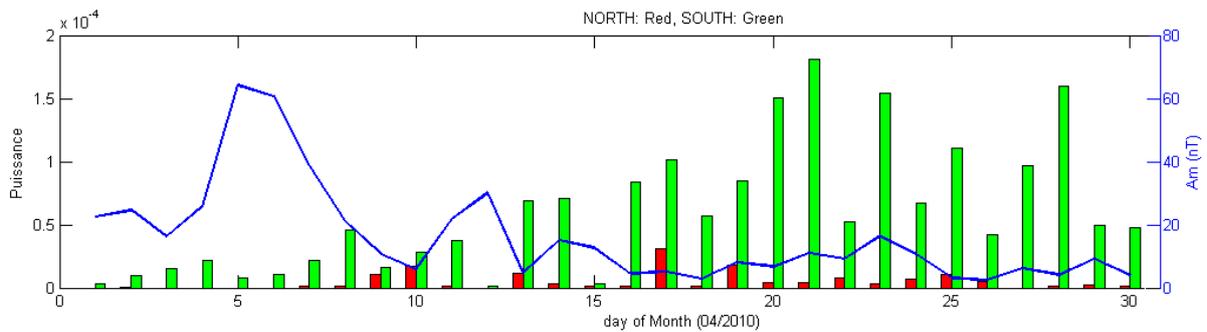


Figure 5.14. Variation de l'occurrence et de l'amplitude des événements avec l'activité magnétique à la suite d'un CME et d'un orage magnétique.

5.7- Mesures de Champ Electrique et influence des perturbations de l'ionosphère supérieure sur l'électrodynamique de l'ionosphère

Les données de l'expérience ICE montrent que des variations quasi-périodiques des champs électriques DC et ULF sont généralement observées simultanément aux perturbations de N_e ou $N(O^+)$ qui servent de critère pour reconnaître et détecter les événements C. Ce paragraphe est consacré à une brève présentation des observations de ICE pour l'événement détecté dans l'hémisphère Sud sur l'orbite 28993.1, déjà mentionné au paragraphe 5.6. Les perturbations de $N(O^+)$ ont la forme d'un train d'ondes, remarquable par sa régularité et sa longue durée, caractérisé par un spectre quasi monochromatique à la fréquence de 0.0146 Hz. Des perturbations de même allure sont observées sur les composantes DC/ULF du champ électrique (*Figure 5.15*).

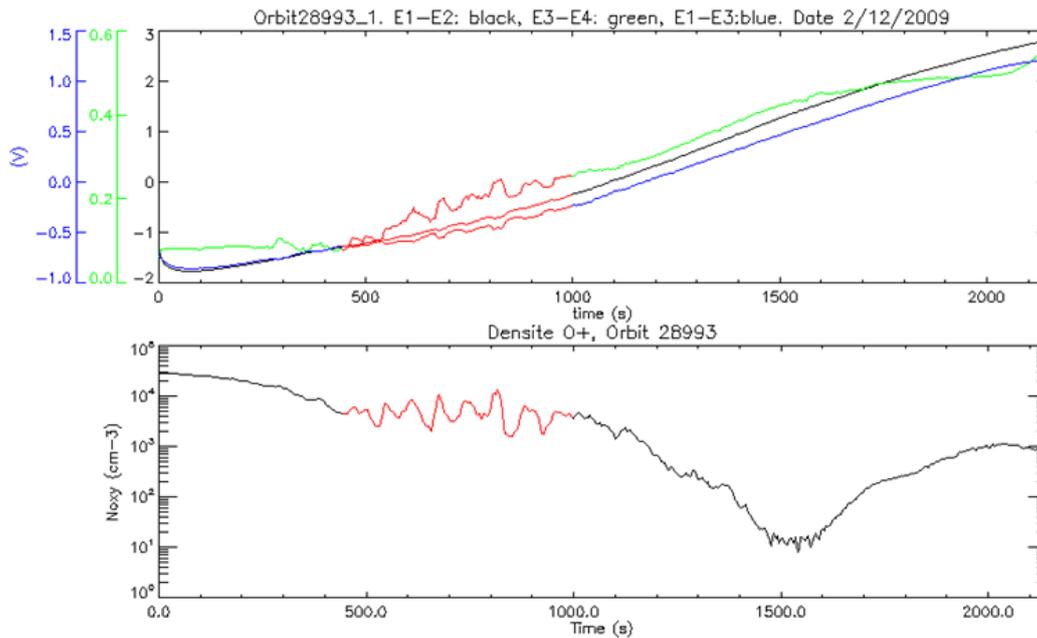


Figure 5.15. Orbite 28993.1, perturbations de type C sur $N(O^+)$ et sur les composantes du champ électrique dans le repère du satellite.

Comme nous l'avons indiqué brièvement au chapitre 2, le fait que DEMETER soit stabilisé 3 axes rend difficile la détermination des composantes continues du champ électrique parce qu'elles sont faussées par des biais importants dus aux différences des travaux de sortie (« work function », WF) entre les 4 électrodes. Nous décrivons ici résultats initiaux obtenus par une correction simplifiée des mesures de champ électrique, utilisable pour des évènements tels que celui de l'orbite 28993.1.

Ce traitement est identique à celui des profils de $N(O^+)$: un ajustement des mesures par un polynôme de degré 7 dans un intervalle de temps étendu de part et d'autre de la durée $[T_1 T_2]$ de l'évènement fournit la ligne de base (Figure 5.16) qui prend en compte les variations à grande échelle du champ électrique ionosphérique E , du champ induit D et des travaux de sortie (termes WF de l'équation 2.15). Les différences entre les mesures et la ligne de base correspondent aux perturbations quasi- périodiques de type C qui nous intéressent.

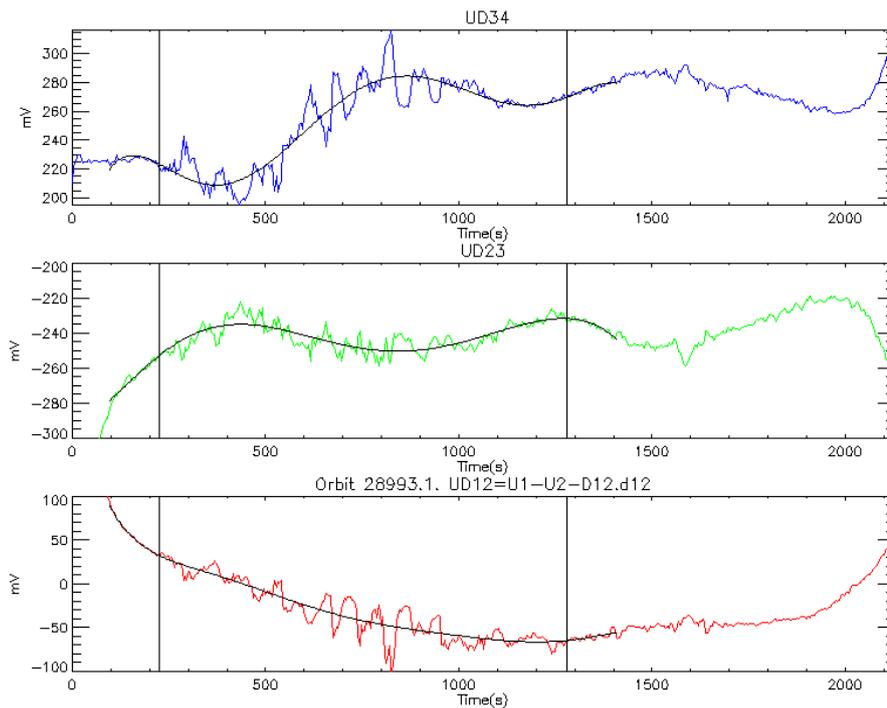


Figure 5.16. Détermination des lignes de base des composantes du champ électrique.

Deux remarques doivent être faites :

(i) cette méthode ne permet pas de déterminer le champ électrique ionosphérique à grande échelle d'origine dynamo qui pré-existe dans l'ionosphère et est nécessaire pour l'apparition des variations à méso-échelle associées aux variations de densité (voir discussion dans le paragraphe 5.8).

(ii) la précision des composantes dans le repère géomagnétique peut être évaluée par le résidu sur la composante E_{b3} parallèle à B qui doit être nulle. La valeur quadratique moyenne de E_{b3} calculée est de l'ordre de 1mV/m , ce qui est raisonnable, mais atteint 2.5mV/m au niveau de certains des maxima et minima des oscillations ce qui donne une idée des erreurs notables commises sur les composantes E_{b1} et E_{b2} perpendiculaires à B . Ces défauts sont liés essentiellement à la méthode d'ajustement qui fournit une ligne de base imprécise lorsque les perturbations ne sont pas symétriques.

Nous avons tracé sur la Figure 5.17 un zoom des variations de $N(O^+)$ et des 2 composantes des oscillations du champ électrique (E_{b1} dans un plan voisin du méridien magnétique local et E_{b2} perpendiculaire à ce plan) et avons repéré les maxima (chiffres) et les minima (lettres) de $N(O^+)$. On constate une très bonne corrélation entre les extrema des oscillations de densité et du champ électrique. La Figure 5.18 représente dans le plan perpendiculaire au champ

magnétique B les 2 composantes du champ électrique et la droite de régression dans ce nuage de points qui montre que le champ électrique oscille approximativement suivant la direction de cette droite. On verra au paragraphe 5.8 que cette direction indique la direction moyenne de propagation de la perturbation et est approximativement perpendiculaire au front d'onde.

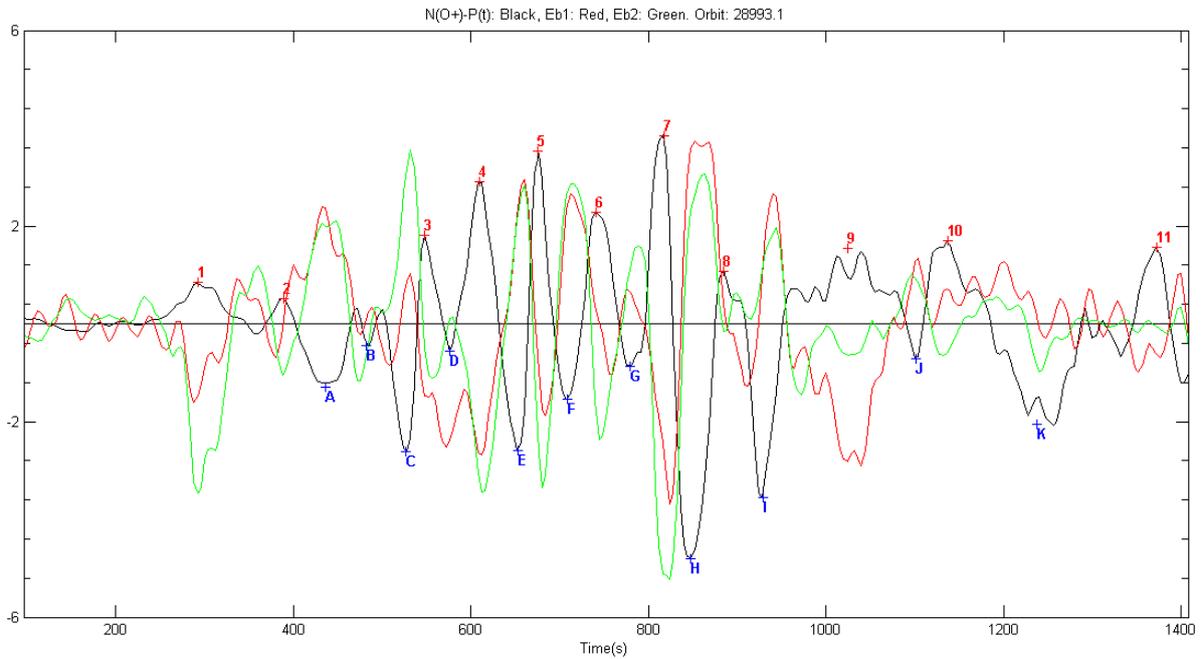


Figure 5.17. Variations simultanées de $N(O^+)$ et des composantes du champ électrique dans le plan perpendiculaire au champ magnétique terrestre.

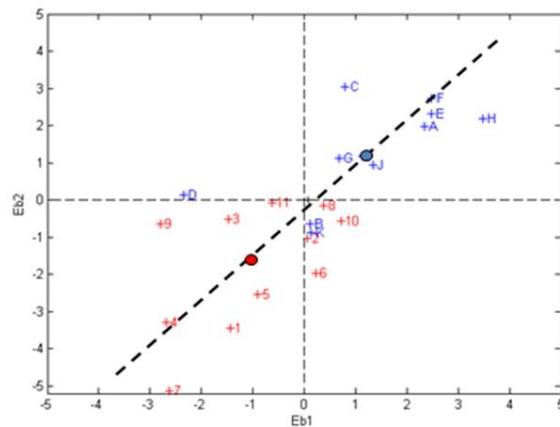


Figure 5.18. Direction de polarisation des oscillations du champ électrique dans le plan perpendiculaire à B .

5.8- Interprétation et discussion des résultats

5.8.1- Résumé des résultats

Les régions d'occurrence s'organisent autour de l'équateur magnétique, dans des intervalles de latitude de l'ordre de $\sim 30^\circ$ dans l'hémisphère Sud, un peu moins dans l'hémisphère Nord. Il y a une forte dissymétrie en longitude avec un maximum d'occurrence dans les secteurs des océans Indien et Pacifique et un minimum dans le secteur de l'Atlantique Sud et de l'Afrique. Dans le secteur de longitude s'étendant de l'Amérique du Sud à l'Inde, les événements sont pratiquement absents aux latitudes magnétiques inférieures à $\sim 5-10^\circ$, c'est-à-dire ne se produisent pas au niveau de l'équateur magnétique. Au contraire, dans les autres secteurs de longitude, une proportion significative d'événements est observée aux très basses latitudes. Ceci est particulièrement vrai pour les 3 années 2007 à 2009. Les événements sont plus fréquents dans les années 2006 et 2009 que dans les années 2005 et 2010.

- L'étude de l'influence de l'activité magnétique sur l'occurrence des événements montre qu'ils sont moins fréquents lorsque l'activité magnétique augmente ce qui paraît exclure une source ou une influence significative des phénomènes auroraux. La variation inter-annuelle montre que l'occurrence des événements et leur variation saisonnières dépendent du cycle solaire avec des comportements différents dans les années de minimum prononcé de l'activité solaire (2008-2009) et dans les années où l'activité solaire et l'activité magnétique sont encore fortes (2005-2006), l'année 2007 semblant être une année de transition entre les 2 régimes.
- L'analyse spectrale des événements montre un maximum à très basse fréquence, autour de 0.006 Hz attribué à une forte proportion d'événements caractérisés par des perturbations irrégulières et peu nombreuses de type impulsionnel et une queue de distribution à plus hautes fréquences due aux événements avec des perturbations sous la forme de trains d'onde plus réguliers et plus étendus dans le temps.

Au cours des événements de type C la densité du plasma ionosphérique et la densité des ions O^+ sont affectées de variations, souvent de grande amplitude, en particulier pour O^+ , qui prennent la forme d'oscillations quasi périodiques autour d'une valeur moyenne. Cette valeur moyenne varie le long de l'orbite car le satellite traverse les grandes régions de l'ionosphère : zones aurorale et sub-aurorale, régions internes de la plasmasphère, régions équatoriales. Les événements C sont observés à moyenne latitude, entre 40° et 20° dans la plupart des cas,

régions dans lesquelles les mécanismes d'ionisation et de transport de l'ionosphère le long du champ magnétique ne sont pas sujets à des variations dans le temps avec des périodes de quelques dizaines à quelques centaines de secondes comme c'est le cas dans les régions de haute latitude, au niveau des arcs auroraux et des courants alignés à petite et moyenne échelle par exemple. Les oscillations quasi périodiques du plasma de type C détectées dans le repère du satellite reflètent donc des variations spatiales de l'ionosphère qui résultent de son couplage avec les ondes de gravité qui se propagent dans la haute atmosphère neutre. Ces phénomènes ont été identifiés depuis fort longtemps au moyen des sondes ionosphériques puis, à partir des années 70, par les sondes à diffusion incohérente (*Testud et al., 1975 ; Vidal-Madjar, 1978a ; 1978b*), et, plus récemment, au moyen des radars ionosphériques comme Super DARN (par exemple *Bristow et al., 1996*), des réseaux de récepteurs GPS, qui fournissent le contenu électronique total (*Tsugawa, 2007*), ou des imageurs optiques (*Fukushima et al., 2012*). Leur étude a montré qu'elles se propageaient en général vers les basses latitudes, et, suivant leur longueur d'onde spatiale, on distingue deux classes principales, désignées « traditionnellement » dans la littérature sous leur vocable anglo-saxon. Les LSTID (Large Scale Traveling Ionospheric Disturbances) avec des longueurs d'ondes supérieures à ~ 1000 km sont engendrées par des ondes de gravité déclenchées par le chauffage de la haute atmosphère aurorale lors des sous-orages (voir par exemple *Testud et al., 1975 ; Hunsucker, 1982*). Les MSTID (Mid-Scale Traveling Ionospheric Disturbances) avec des longueurs d'ondes plus faibles comprises entre quelques centaines et ~ 1000 km, sont engendrées par des ondes de gravité atmosphériques qui prennent naissance à des altitudes variables, en particulier au niveau du jet-stream de la tropopause (voir par exemple *Vidal-Madjar et al., 1978*). Les événements C, avec des périodes observées dans le repère du satellite entre ~ 70 et ~ 160 s, c'est-à-dire des longueurs d'onde spatiales comprises entre ~ 450 et 1200 km sont donc des MSTID.

5.8.2- Résultats obtenus dans ce domaine

Depuis leur mise en évidence par les sondages ionosphériques et l'article fondateur de *Hines (1960)* sur les ondes de gravité de la haute atmosphère, les TID ont fait l'objet d'un nombre considérable de travaux théoriques, de modélisation ou expérimentaux en raison de leur intérêt pour la physique de l'ionosphère de moyenne et basse latitude mais aussi de leur importance pratique pour la propagation des ondes radio-électriques (voir par exemple *Pitteway and Hines, 1965 ; Francis, 1974 ; Hooke, 1968 ; Hunsucker, 1982 ; Hocke and*

Schlegel, 1996 ; Johnson et al., 1995 ; Saito et al., 1998 ; Tsugawa et al., 2007). L'apparition de nouveaux moyens d'observation de l'ionosphère depuis le sol tels les réseaux denses de récepteurs GPS, les radars trans-horizon HF du réseau Super-DARN et l'amélioration des techniques optiques ont largement renouvelé les recherches au cours des dix dernières années (Saito et al., 2001 ; Shiokawa et al., 2003 ; Onishi et al., 2009; Ishida et al., 2008; Ding et al., 2011; Moffat-Griffin et al., 2011; Grocott et al., 2013; Frissell et al., 2014) et permis notamment d'étudier les phénomènes conjugués (Otsuka et al., 2004; Shiokawa et al., 2005). Il faut aussi mentionner que les TID sont la manifestation la plus claire des couplages entre l'ensemble de l'atmosphère et l'environnement ionisé de la Terre, que ces couplages existent aussi sur d'autres planètes et, enfin, que l'observation des TID donne un accès indirect aux ondes de gravité atmosphériques qui constituent un thème de recherches important pour la physique atmosphérique, la météorologie et la climatologie.

5.8.3 Interprétation

Les caractéristiques des événements C présentées dans ce chapitre en font une classe particulière des MSTID dont les spécificités peuvent se résumer ainsi :

- Phénomènes de moyenne latitude, ils s'organisent, comme les phénomènes ionosphériques, par rapport au champ magnétique terrestre et sont observés essentiellement dans des régions magnétiquement conjuguées entre 20° et 40° de latitude géomagnétique, une petite proportion d'entre eux s'étendant au-dessus de l'équateur magnétique de ~20° dans un hémisphère jusqu'aux basses latitudes (<5-7°) de l'hémisphère opposé. La *Figure 5.19* donne un schéma qui peut expliquer cette répartition :

Les ondes de gravité atmosphériques qui, dans le Nord, se propagent jusqu'à des latitudes correspondant au pied des lignes de force 1 vont engendrer dans l'ionosphère à l'altitude de DEMETER des MSTID (de type CEN, voir paragraphe 5.4) observables jusqu'à l'équateur et même dans l'hémisphère opposé proche par continuité dans le tube de force. Par contre, dans le Sud, les ondes de gravité atmosphériques qui se propagent entre les pieds des lignes de force 3 et 2 vont donner des TID (de type CS) observables uniquement lorsque ce DEMETER se trouve dans le tube de force délimité par les lignes de force 2 et 3. Utilisant le code ionosphérique SAMI2 et un modèle simplifié d'ondes de gravité, *Onishi et Berthelier* (2012) ont montré qu'en l'absence de dissipation, les perturbations ionosphériques peuvent se propager le long des tubes de force dans l'hémisphère

conjugué. SAMI2 ne prend pas en compte, dans l'ionosphère non collisionnelle, les mécanismes de dissipation qui doivent cependant exister et limiter la propagation à des distances plus réduites. Dans ce cas, il est naturel que les perturbations observées dans l'hémisphère Sud entre les lignes de force 3 et 2 ne puissent pas se propager jusque dans l'hémisphère Nord et être observables par DEMETER dans la région conjugquée de celle indiquée en pointillé sur la figure.

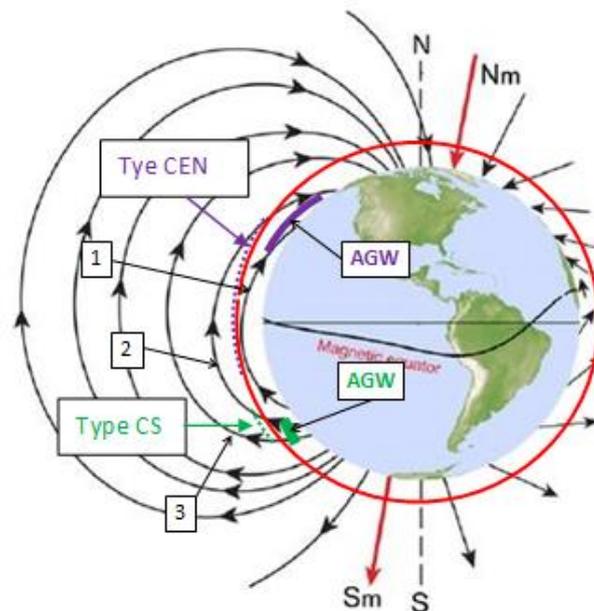


Figure 5.19.

- Observés essentiellement de nuit et en plus grande proportion dans l'hémisphère Sud, ils montrent une répartition en longitude très dissymétrique avec un maximum d'occurrence dans le secteur des océans Indien et Pacifique, principalement au large de l'Amérique du Sud. On sait que l'ionosphère montre des asymétries hémisphériques sensibles, mais il semble que l'explication de la distribution des événements en latitude et en longitude soit à rechercher au niveau de la source c'est-à-dire dans la génération des ondes de gravité atmosphériques. Cependant, l'occurrence des événements de type C dépend de deux ensembles de phénomènes distincts, d'une part la génération des ondes de gravité dans l'atmosphère à basse altitude, d'autre part la dynamique du plasma ionosphérique et ces deux milieux ne répondent pas de la même façon à la variation de l'activité solaire et magnétique. Ceci va donc rendre la variabilité de l'occurrence des événements plus complexe.
- Enfin, des perturbations morphologiquement semblables à celle de la densité $N(O^+)$ sont observés sur les mesures du champ électrique ionosphérique. Pour un des événements les

plus remarquables détecté dans l'hémisphère Sud, les MSTID s'accompagnent de perturbations de grande amplitude qui structurent le champ électrique dans l'ionosphère et sont associées à une turbulence électrostatique intense. Ces observations rappellent celles de *Park et al.* (2008) concernant les courants alignés mesurés par le satellite CHAMP et de *Saito et al.* (1995) concernant les intensifications des fluctuations ULF et ELF des champs électriques détectées par le satellite DE2, toutes deux réalisées dans les mêmes régions de latitude que celles des événements C.

L'onde de gravité interagit avec le plasma ionosphérique depuis la base de l'ionosphère jusqu'à l'altitude où l'onde devient évanescence car la densité des neutres est trop faible pour que l'onde puisse se maintenir. Au-delà de cette altitude, la perturbation du plasma se propage le long des tubes de force du champ magnétique à la vitesse des ondes acoustiques ioniques (*Onishi et al.*, 2009). Au-dessous de l'altitude de DEMETER (650 km), l'ensemble du profil de l'ionosphère est perturbé par le passage de l'onde de gravité, en particulier dans la région dynamo, au-dessous de ~160 km, ce qui a pour conséquence de modifier la conductivité intégrée donc la structure des courants et du champ électrique dans cette région. Ce mécanisme particulier de couplage entre la haute atmosphère neutre et l'ionosphère a été étudié par *Jacobson and Bernhardt* (1985), *Miller et al.* (1997), *Miller* (1997), *Kelley and Miller* (1997) dont les modèles prévoient une structuration du champ électrique dynamo et son amplification au passage de la TID par suite de l'instabilité de l'ionosphère. Les perturbations du champ électrique présentées sur les *Figures 5.16 à 5.18* confirment bien l'existence d'un tel phénomène dont l'analyse n'a pas pu être achevée dans le cadre de cette thèse mais sera poursuivie en considérant également d'autres événements.

CHAPITRE 6

EVENEMENTS D ET E ET DYNAMIQUE DE L'IONOSPHERE DE BASSE LATITUDE

Ce chapitre est consacré à l'étude des deux derniers types d'évènements présentés au chapitre 4. Les évènements de type D sont caractérisés par des augmentations de la densité du plasma visibles sur les profils le long de l'orbite de la densité électronique N_e et, souvent plus nettement, de la densité des ions lourds O^+ , $N(O^+)$. La morphologie de ces perturbations est très variable : les évènements D1 et D2 sont des perturbations de courte durée le long de l'orbite, correspondant à des échelles spatiales de l'ordre de quelques centaines de kilomètres au maximum, d'amplitude modérée, associées par paires le long de la même orbite dans le cas des évènements D2. Les deux autres types d'évènements, D3 et D4, constituent, au contraire, des perturbations majeures de l'ionosphère supérieure pouvant intéresser des régions étendues de part et d'autre de l'équateur magnétique. Les évènements de type E correspondent en fait aux bulles de plasma équatoriales. Ces phénomènes faisant l'objet d'un autre travail, nous ne nous y sommes intéressés que dans l'optique de leur association avec les évènements de type D4. Après une brève présentation de la morphologie de l'ensemble de ces perturbations, nous décrivons les traitements effectués pour les caractériser de façon précise puis nous étudions leur évolution inter-annuelle et leurs variations saisonnières au cours des 6 ans, 2005-2010, de la période opérationnelle de DEMETER. Dans un dernier paragraphe nous discutons ces résultats en les replaçant dans le contexte de la dynamique de l'ionosphère de basse latitude, indiquons l'apport de nos observations dans ce domaine et, pour conclure, mentionnons les idées qui se dégagent pour des travaux futurs.

6.1- Description et détection des évènements

Comme les évènements C présentés au chapitre précédent, les évènements de type D et E ont d'abord été détectés visuellement sur les profils le long d'orbite de N_e et $N(O^+)$ et, d'après la morphologie des perturbations, nous avons distingué 4 types d'évènements D.

6.1.1- Type D1

Un exemple caractéristique est présenté sur la *Figure 6.1*. On observe une seule augmentation de N_e et $N(O^+)$, indiquée par les 2 traits verticaux, dont la durée est brève, inférieure à la minute, soit une extension de quelques centaines de km au maximum essentiellement en latitude étant donné l'inclinaison de l'orbite. Ce type de variation est analogue aux structures connues sous le nom de « blobs », mises en évidence par *Le et al.*, (2003) et par *Park et al.* (2003) sur les données du satellite ROCSAT-1. Lorsque l'augmentation de densité dans un blob est suffisante, les données de DEMETER montrent une diminution de la température électronique T_e et la présence de turbulence électrostatique (voir le panneau inférieur, spectrogramme du champ électrique ELF tiré des données ICE), en accord avec les observations de ROCSAT-1.

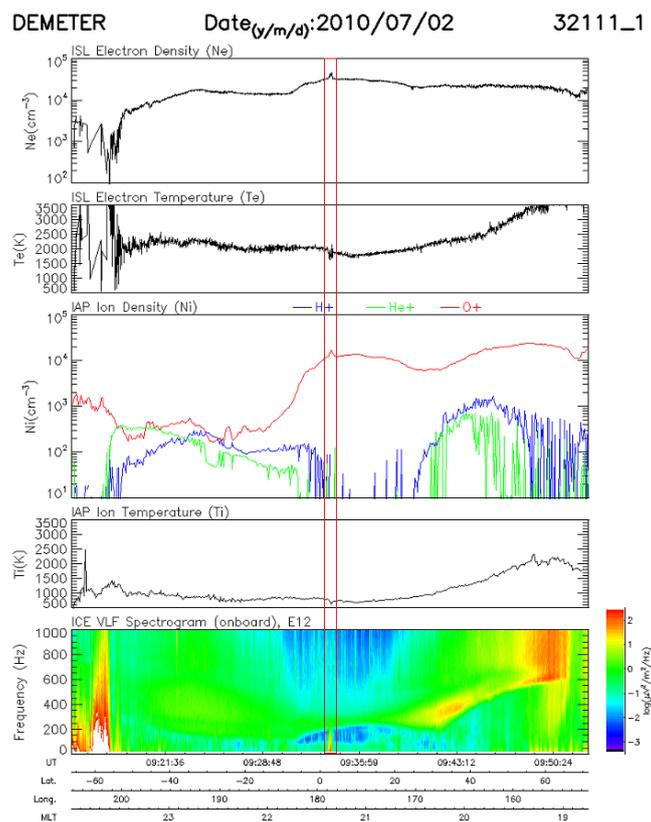


Figure 6.1. Événement de Type D1

6.1.2- Type D2

Ces événements sont caractérisés par l'occurrence sur la même orbite de 2 augmentations de N_e et $N(O^+)$ avec des caractéristiques semblables à celles des événements D1 comme le montre la *Figure 6.2*. Ces perturbations peuvent se produire dans le même hémisphère et

dans un intervalle de latitude limité, ou bien dans des hémisphères opposés et, dans ce cas souvent dans des régions magnétiquement conjuguées. C'est cette seconde caractéristique, observée assez fréquemment, qui nous a conduits, au début de l'étude, à distinguer les évènements D1 et D2 mais, la similitude de leur morphologie et de la nature des perturbations observées indiquent qu'ils tirent leur origine des mêmes phénomènes ionosphériques et, dans la suite de ce travail, nous les avons regroupés. La *Figure 6.2* montre un cas de perturbations conjuguées avec des amplitudes suffisamment fortes pour engendrer, comme dans le cas des types D1, des perturbations de la température électronique T_e et une turbulence électrostatique notable.

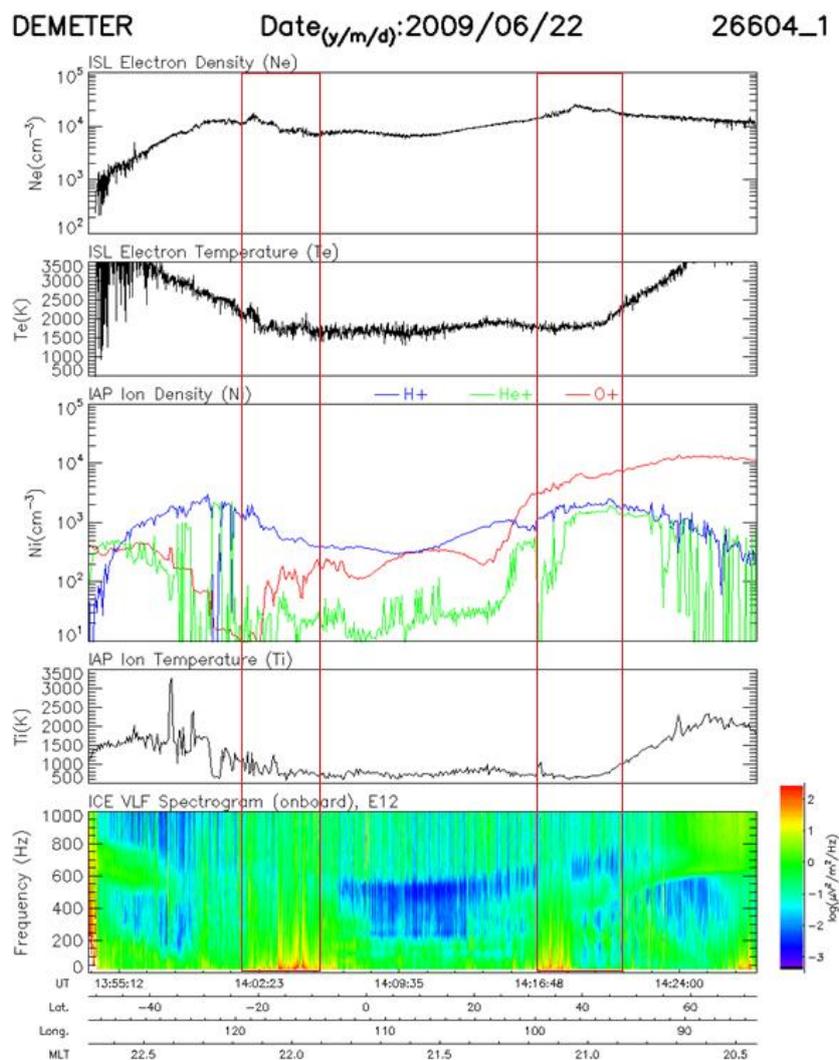


Figure 6.2. Événement de Type D2

6.1.3- Type D3

Ces évènements sont caractérisés par une augmentation à grande échelle de la densité du plasma, très claire sur les profils de N_e et $N(O^+)$ comme le montre la *Figure 6.3*. Cette perturbation prend la forme d'un plateau avec des gradients assez forts sur les flancs, la densité pouvant être uniforme dans le plateau ou montrer une dépression en son centre comme on peut le voir plus facilement sur le profil de $N(O^+)$ en raison d'une échelle plus appropriée. On n'observe pas de variations de densité à moyenne échelle pendant le plateau.

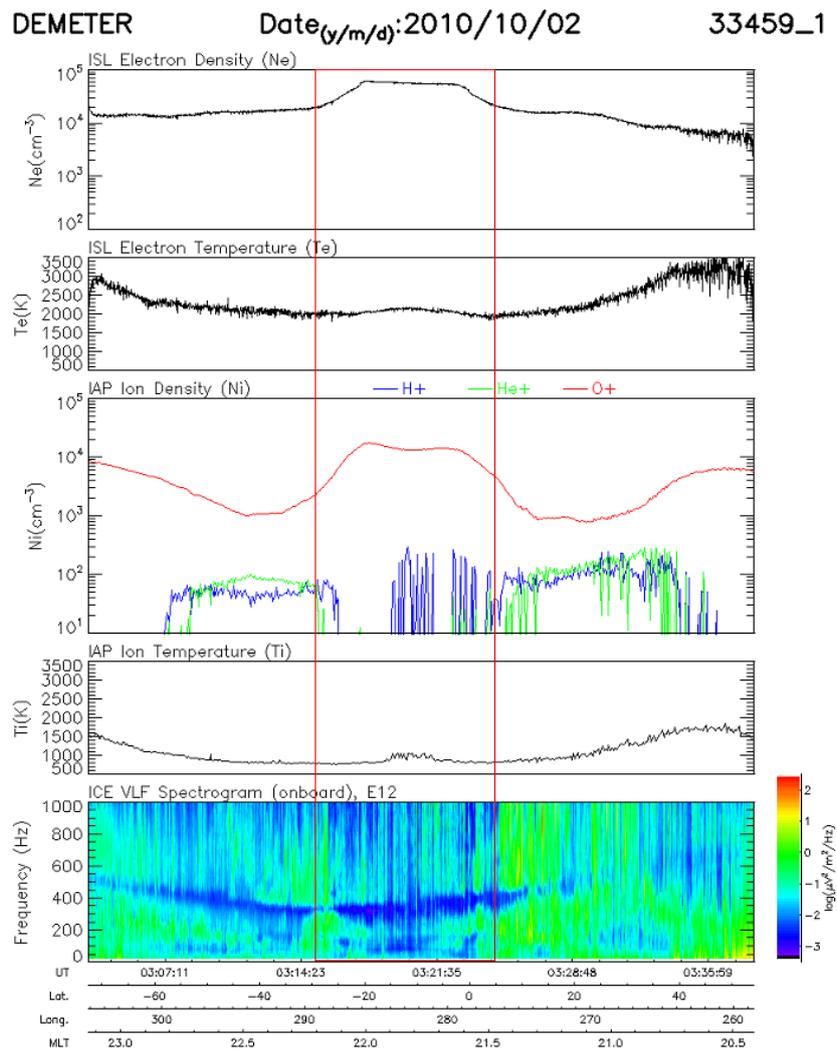


Figure 6.3. Évènement de Type D3

6.1.4- Type D4

Comme pour les évènements D3, on observe un plateau à grande échelle sur les profils de N_e et $N(O^+)$ mais, contrairement aux évènements D3, le plateau n'est plus uniforme et présente des dépressions notables à moyenne échelle éventuellement accompagnées de

fluctuations des densités à petite échelle mais avec une faible amplitude. La *Figure 6.4* présente le cas d'une dépression unique associée à une diminution de la température électronique T_e et à des fluctuations de N_e sur les bords de la structure. Les augmentations apparentes de la température ionique T_i sur les flancs du plateau sont dues à un fonctionnement défectueux du logiciel de traitement, comme cela a été signalé au Chapitre 4, par contre l'augmentation de T_i au centre de la dépression est réelle mais de faible amplitude.

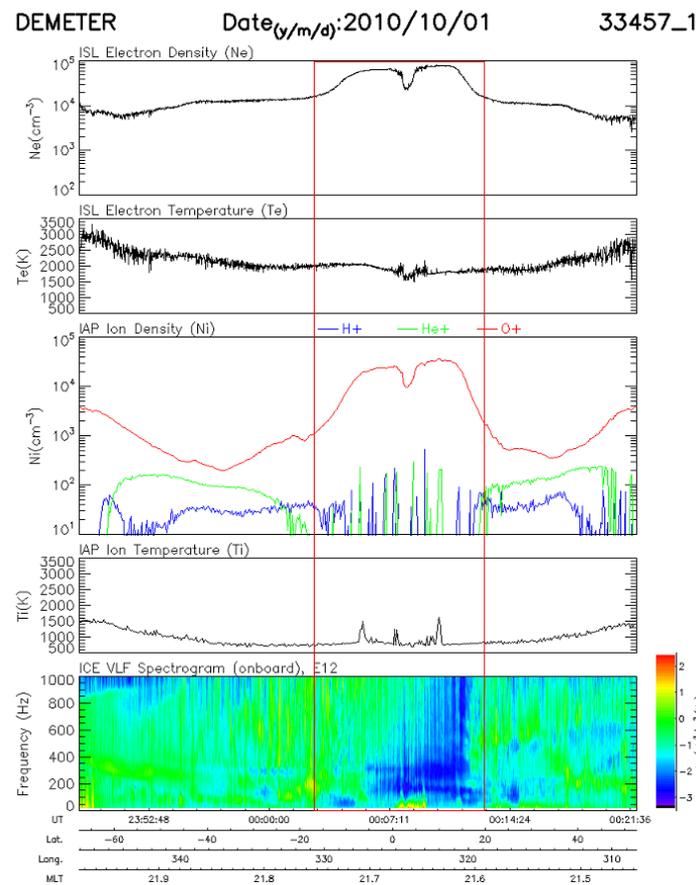


Figure 6.4. Événement de Type D4

6.1.5- Type E

Les Figures 4.10 et 6.5 donnent des exemples typiques des événements de type E. Ces derniers se caractérisent par la présence de fluctuations irrégulières très rapides et de grande amplitude de la densité électronique associées à une turbulence électrostatique très intense observée sur les mesures de champ électrique par ICE jusqu'à des fréquences de 500 à 1000 Hz. Le plus souvent, ces irrégularités à petite échelle du plasma s'accompagnent de l'existence de structures à moyenne échelle dans lesquelles la densité électronique peut chuter de 2 ou 3 ordres de grandeur, les irrégularités du plasma se développant préférentiellement sur

les flancs de ces dépressions de densité. L'observation de telles instabilités dans l'ionosphère équatoriale de nuit remonte aux années 70 avec un premier article fondé sur les mesures du radar de Jicamarca (*Farley et al., 1970*) montrant l'apparition de « plumes » de plasma dans lesquelles l'existence d'irrégularités de très petite échelle (quelques mètres) induisait une très forte réflectivité. La multiplication des techniques d'observation à la fois au sol (radars) mais surtout sur fusées et satellite et les efforts théoriques et de modélisation ont permis des progrès considérables dans la compréhension des mécanismes physiques à l'origine des dépressions de densité et des irrégularités à petite échelle qui les accompagnent (voir par exemple l'ouvrage de *M.C. Kelley, 1989* et références incluses ; *Taori et al., 2010* ; *Huba et al., 2010*). On sait qu'elles tirent leur origine de l'instabilité de l'ionosphère vers ~ 170 - 200 km (instabilité de Rayleigh-Taylor) qui aboutit à la création de « bulles » de plasma de faible densité qui montent dans l'ionosphère supérieure et donnent lieu aux dépressions de densité observées par satellite qui s'accompagnent simultanément d'instabilités à petite échelle responsables de la turbulence électrostatique. Les caractéristiques morphologiques des événements de type E montrent à l'évidence que ceux-ci correspondent à des bulles de plasma.

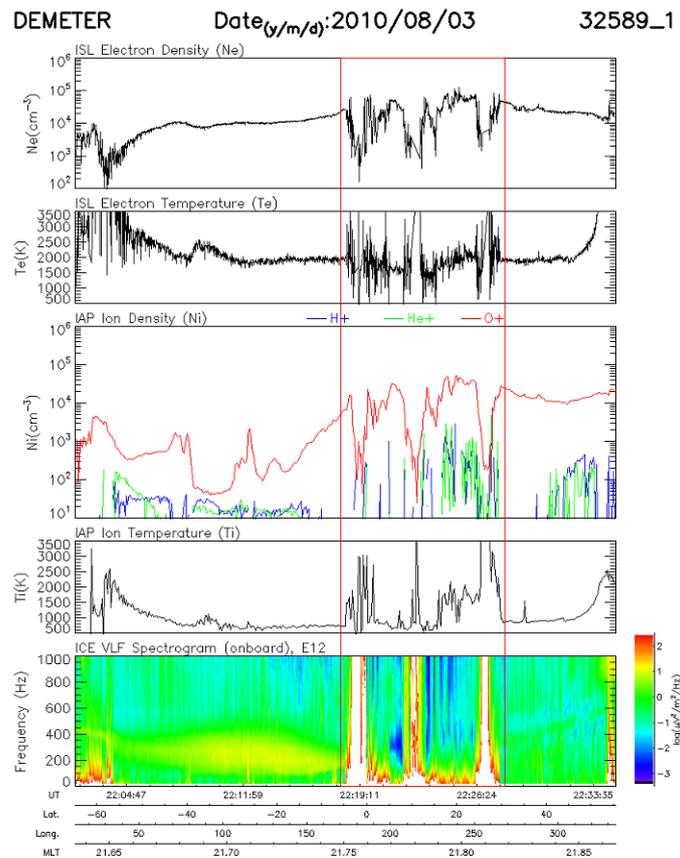


Figure 6.5. Evènements de type E, bulles de plasma équatoriales.

6.2- Caractérisation détaillée des évènements et traitement des données.

L'objectif du traitement est de fournir une description quantitative de la morphologie des évènements en définissant et en reconnaissant automatiquement un certain nombre de points caractéristiques qui déterminent l'extension des perturbations, leur amplitude et leur forme, paramètres qui serviront aux études statistiques ou physiques ultérieures.

Les étapes principales consistent donc à :

- (i) déterminer les temps début (T_1) et fin (T_2) de chaque évènement.
- (ii) déterminer les temps où sont observés les maxima des augmentations de densité des évènements de type D1 et D2.
- (iii) déterminer les temps de début ($Tp1$) et de fin ($Tp2$) du plateau pour les types type D3, D4, E.
- (iv) déterminer, pour les évènements de type D4 et pour chacune des dépressions de densité à moyenne échelle, les 3 temps caractéristiques de ces dépressions : début Ta , fin Tc et minimum de densité Tb .

6.2.1- Standardisation de l'échantillonnage des données

Les données de l'instrument ISL (Ne , Te) sont disponibles avec une résolution 1s pendant les deux modes de fonctionnement de DEMETER, *Survey* et *Burst* alors que les données fournies par l'instrument IAP (Ni , Ti) ont des résolutions différentes, 4.3s en *Survey* et 2.7s en *Burst*. De la même façon que pour les évènements de type C, nous avons standardisé la résolution temporelle des données en calculant une valeur des différents paramètres du plasma le long de l'orbite avec un pas uniforme $\Delta t=4s$. Pour Ne , on calcule à chaque temps t_n la valeur moyenne sur 7 points, entre t_n-3 et t_n+3 , ce qui diminue le « bruit » assez élevé constaté sur les données de l'instrument ISL dont l'origine est essentiellement numérique et liée au programme de traitement des données brutes. Nous conserverons ainsi les variations physiques « lissées » des paramètres à l'échelle de quelques dizaines de secondes qui sont appropriées pour l'analyse des évènements D et pour décrire les structures à grande et moyenne échelle des évènements E.

6.2.2- Traitement des évènements D1 et D2

A partir des temps approximatifs Td et Tf de début et fin d'évènement déterminés visuellement, on cherche le temps Tp du maximum de Ne en utilisant des moyennes glissantes sur 3 points calculées à partir de Td . On cherche ensuite sur l'intervalle de temps $[Td-\Delta T1, Tp]$

où $\Delta T1 = T_p - T_d$, le temps T_1 où la dérivée seconde de $Ne(t)$ est maximum : ce temps correspond au début de l'évènement. La même méthode, appliquée entre T_p et $T_f + \Delta T2$ où $\Delta T2 = T_f - T_p$ permet de trouver le temps T_2 fin de l'évènement. Pour les évènements D2, on obtient 2 groupes de résultats $[T_1, T_p, T_2]^1$ et $[T_1, T_p, T_2]^2$ correspondant aux 2 augmentations de densité. La Figure 6.6 illustre la méthode et ses résultats.

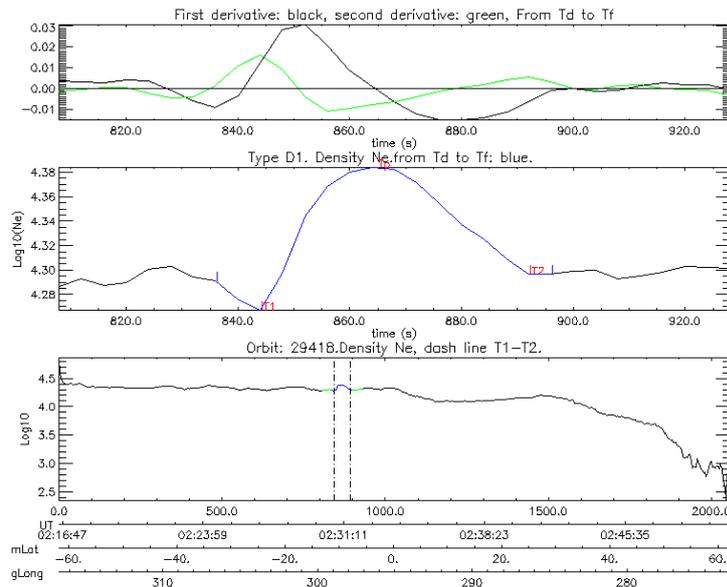


Figure 6.6. Détermination des temps début (T_1) et fin (T_2) d'un évènement de Type D1

6.2.3- Traitement des évènements D3

Détermination des temps début et fin T_1 et T_2

Dans ce cas, on ne connaît pas de point qui serait proche du centre de l'évènement comme le maximum de densité au temps T_p pour les évènements D1 et D2. On définit alors un intervalle de temps $\Delta T = (T_f - T_d)/3$ et on détermine le temps début d'évènement T_1 avec la méthode précédente en utilisant les mesures de Ne entre $T_d - \Delta T$ et $T_d + \Delta T$ puis le temps T_2 en utilisant les mesures de Ne entre $T_f - \Delta T$ et $T_f + \Delta T$.

Analyse du plateau : détermination du minimum au centre du plateau (temps T_{min}) et des maxima relatifs qui l'encadrent (temps T_{max1} et T_{max2})

Dans les cas où il y a une décroissance de densité significative pendant le plateau (évènements de type D31) on cherche à préciser le profil de Ne dans le plateau en déterminant les temps T_{min} , T_{max1} et T_{max2} définis ci-dessus.

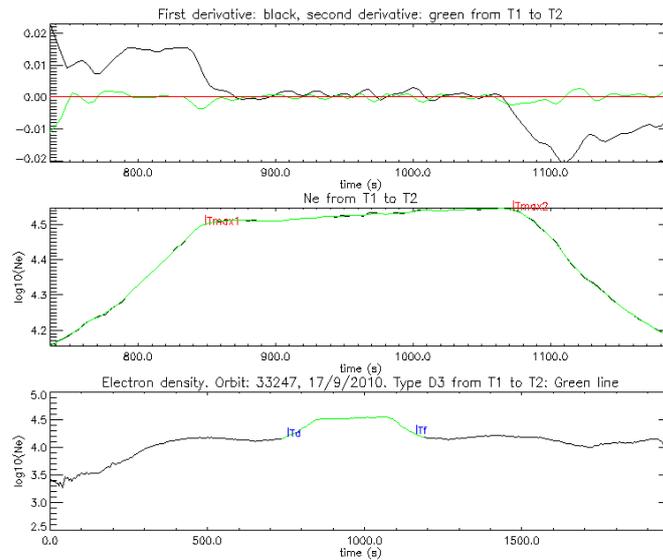


Figure 6.7.a. Détermination des temps caractéristiques d'un évènement de type D32 sans minimum relatif de la densité électronique Ne dans le plateau.

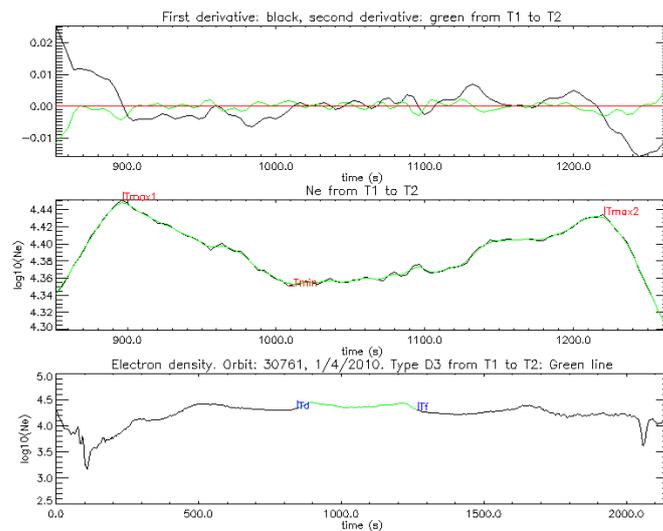


Figure 6.7.b. Détermination des temps caractéristiques d'un évènement de type D31 avec un minimum relatif de la densité électronique dans le plateau.

Dans le cas où le plateau ne présente pas de minimum significatif (évènements de type D32) les temps T_{max1} et T_{max2} seront définis par les ruptures de pente qui se produisent respectivement sur le flanc ascendant après T_1 et sur le flanc descendant avant T_2 .

On commence par déterminer les 2 temps T_{max1} et T_{max2} en utilisant conjointement les dérivées première et seconde du profil $Ne(t)$. Pour ce qui concerne T_{max1} , on débute le traitement au temps t qui suit immédiatement T_1 et, en utilisant des moyennes glissantes sur 3 points pour lisser suffisamment le signal, on recherche le maximum de la dérivée première Ne' sur l'intervalle de temps $[T_1, T_1 + \Delta T]$. Autour de ce maximum on détermine le temps

T_{max1} auquel la dérivée seconde Ne'' est négative et minimum. En utilisant la même méthode sur l'intervalle $[T_2 - \Delta T, T_2]$ mais en intervertissant les critères (recherche d'un minimum de Ne' et d'un maximum de Ne'') on détermine le temps T_{max2} .

Pour distinguer automatiquement les sous-types D31 et D32, on utilise une méthode simple. On cherche le minimum de densité entre T_{max1} et T_{max2} : si la valeur de la densité en ce point est inférieure aux valeurs de la densité aux temps T_{max1} et T_{max2} , on est dans le cas D31 et le temps correspondant T_{min} est celui du minimum du plateau. Dans le cas contraire on se trouve dans le cas d'un événement D32. La méthode et ses résultats sont illustrés sur les *Figures 6.7a* (pour un type D32) et *6.7b* (pour un type D31).

6.2.3- Traitement des évènements D4

On adopte la même approche que dans le cas des évènements D3 pour déterminer $T1$, $T2$, T_{max1} et T_{max2} .

Détermination des trous de densités

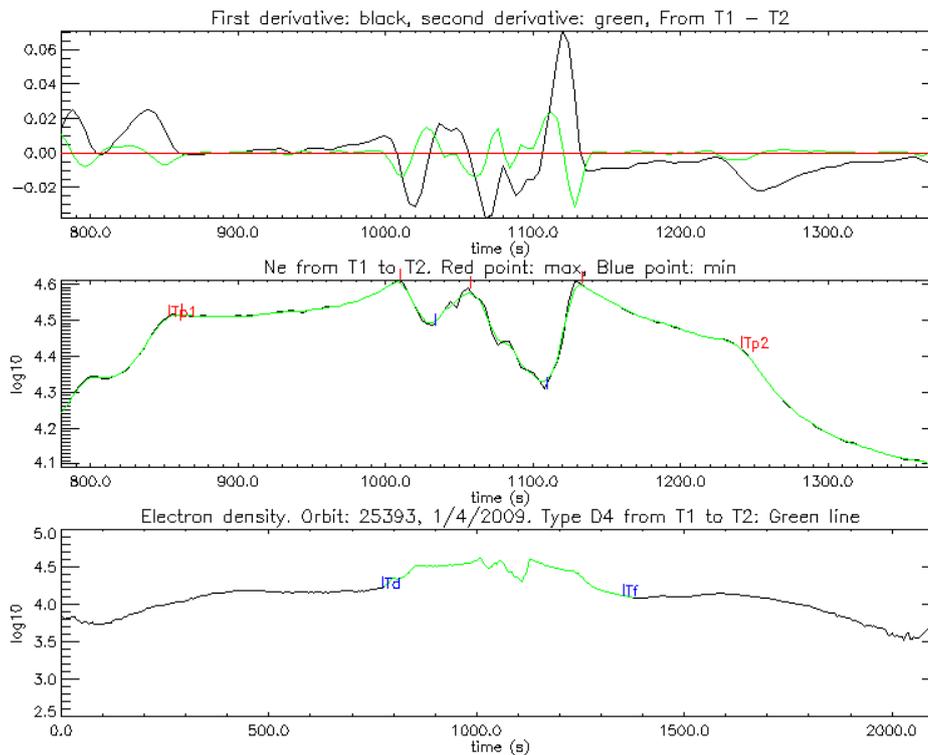


Figure 6.8.a. Détermination des temps caractéristiques d'un évènement de type D4 avec indication par une marque bleu des positions des minima des « trous » de densité à moyenne échelle et par une marque rouge des temps début et fin de ces structures. Comme dans de nombreux cas la seconde structure débute immédiatement à la fin de la première, les temps T_b de la première et T_a de la seconde étant alors confondus.

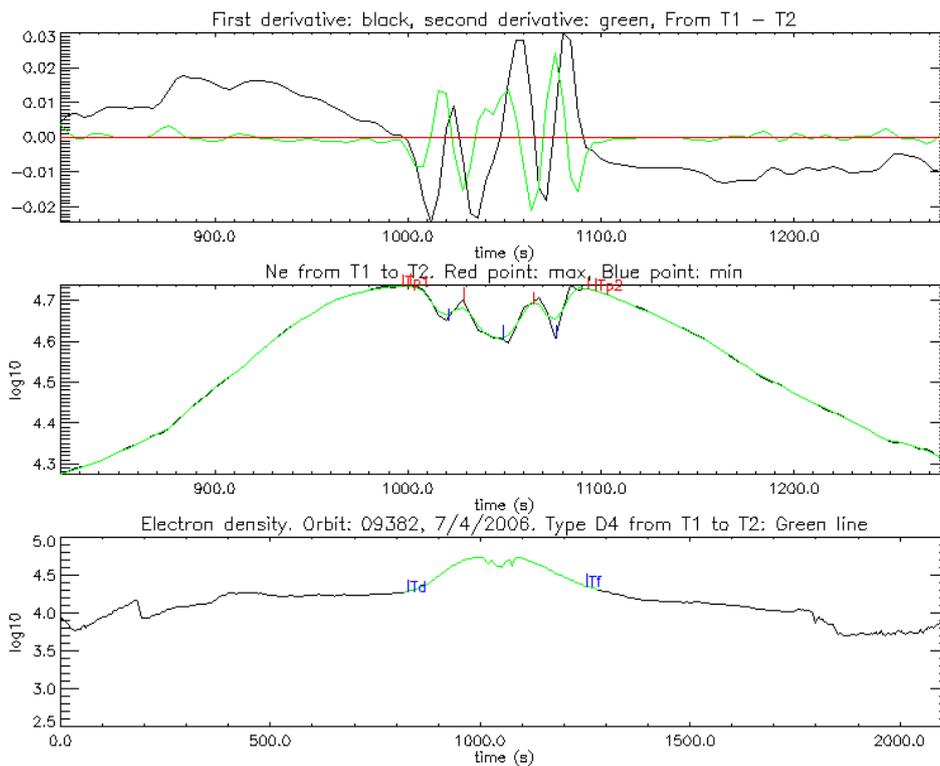


Figure 6.8.b. Détermination des temps caractéristiques d'un évènement de type D4 avec indication par une marque bleue des positions des minima des « trous » de densité à moyenne échelle et par une marque rouge des temps début et fin de ces structures. Comme dans le cas précédent, les structures à moyenne échelle s'enchainent, le temps fin de l'une correspondant au temps début de la suivante.

Pour chacune des dépressions de densité à moyenne échelle, appelés dans la suite « trous » de densité, on cherche à détecter les temps début T_a et fin T_b et le temps T_m correspondant au minimum de la densité dans le trou. La méthode de traitement est fondée sur l'utilisation conjointe des dérivées première Ne' et seconde Ne'' du profil de densité $Ne(t)$ le long de l'orbite, et est analogue à celle mise en œuvre pour caractériser les types D3 et nous donnons seulement sur les Figures 6.8a et 6.8b deux exemples qui illustrent les bonnes performances de l'algorithme de traitement pour un profil compliqué.

6.3- Régions d'occurrence des évènements

6.3.1- Evènements D1 et D2

La Figure 6.9a montre, pour l'ensemble des évènements D1 recensés entre 2005 et 2010, les segments d'orbites sur lesquels a été détecté un évènement. Leur distribution s'organise autour de l'équateur magnétique mais avec deux particularités :

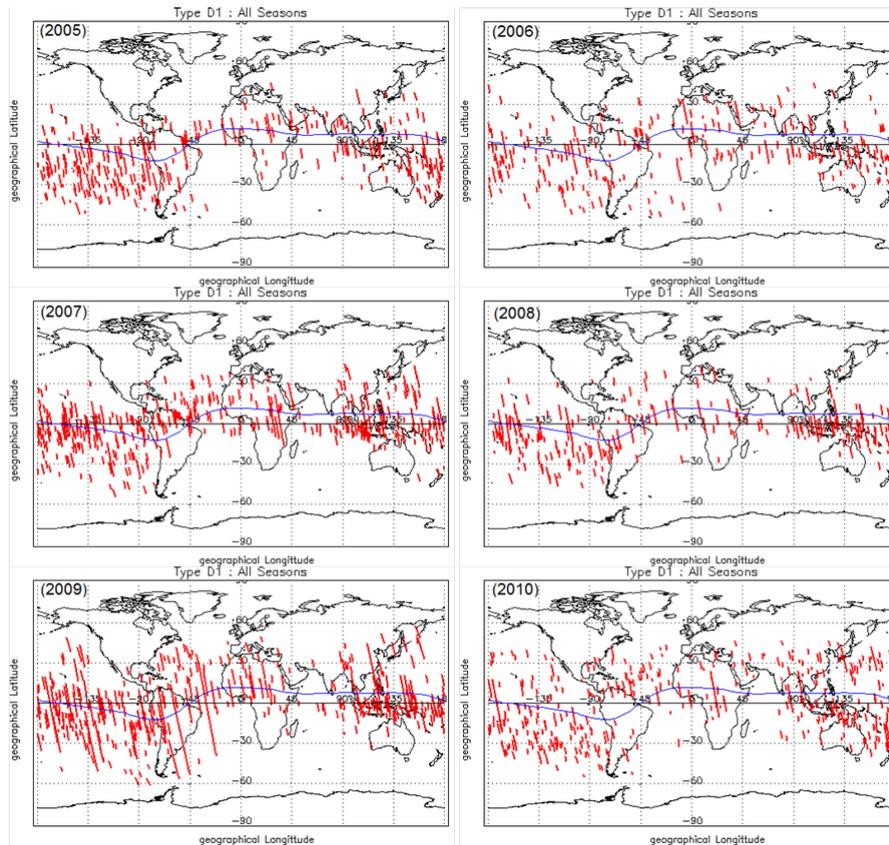


Figure 6.9.a. Distribution géographique des évènements D1. Les segments de grande longueur sont des artefacts du traitement et ne sont pas à considérer.

- l'existence de deux secteurs de longitude où la fréquence des évènements est maximale quelque soit l'année, un secteur étroit au niveau de l'Asie du Sud-Est et une zone plus étendue dans le Pacifique avec une asymétrie hémisphérique prononcée favorisant les latitudes Sud.
- une très faible probabilité d'occurrence dans le secteur de l'Afrique.

On remarque, notamment dans le secteur du Pacifique, l'existence d'évènements aux moyennes latitudes, souvent au delà de 45 à 50°. En raison de l'inclinaison de son orbite (35°) ROCSAT-1 était limité à l'observation des régions équatoriales et tropicales et les observations de DEMETER remettent partiellement en cause l'interprétation des « blobs » proposée par *Le et al.* (2003) et *Park et al.* (2003). Celle-ci se fonde sur la propagation le long des tubes de force du champ magnétique des champs électriques de polarisation qui se développent dans les bulles de plasma équatoriales. Il est, en effet, difficile de penser que ces bulles peuvent exister à des latitudes de l'ordre de 50°.

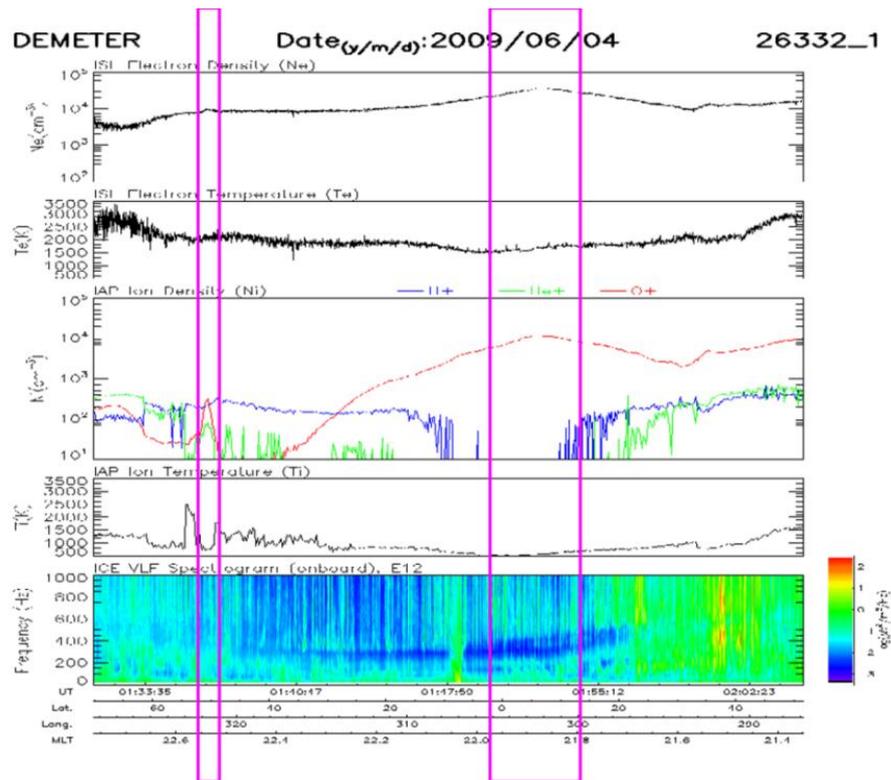


Figure 6.9.b. Evènement D1 observé à moyenne latitude (voir texte)

La Figure 6.9b illustre cette question en montrant un exemple individuel intéressant sur l'orbite 26332.1. Un évènement D1 est détecté dans l'hémisphère Sud en début d'orbite à une latitude de $\sim 50^\circ$ alors que le passage à l'équateur montre une ionosphère calme avec une simple augmentation modérée de la densité électronique N_e (évènement D3 repéré par les traits verticaux). L'évènement D1 se caractérise par un pic très net de $N(O^+)$, bien visible aussi sur $N(He^+)$ qui ne peut pas s'expliquer, en raison de la latitude trop élevée et de l'absence de perturbations équatoriales, par une connexion le long du champ magnétique avec des bulles de plasma.

La Figure 6.10 montre la distribution géographique des évènements D2. Ces évènements sont moins nombreux que les évènements D1 avec un seul maximum d'occurrence significatif dans le secteur du Pacifique Sud, et la même dissymétrie hémisphérique que celle des évènements D1. Les évènements D1 et D2 semblent donc être manifestation de perturbations ionosphériques de même nature que les résultats de ce paragraphe justifient de les considérer dans l'avenir comme un seul type d'évènement.

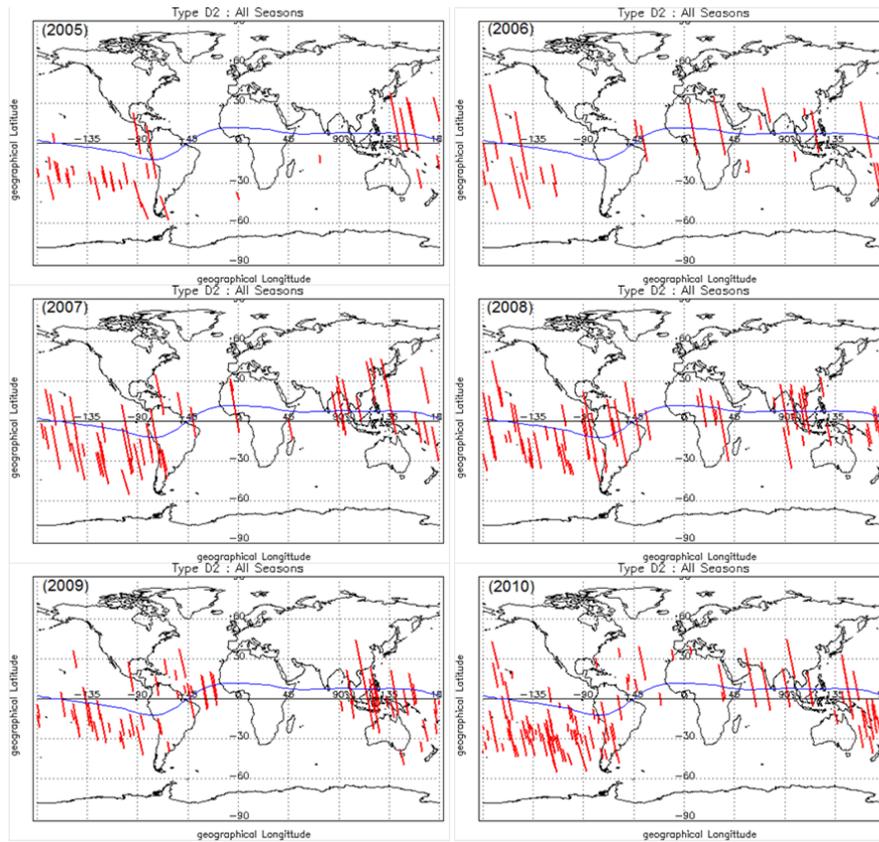


Figure 6.10. Distribution géographique des évènements D2. Les tracés relient le premier évènement au second, chaque évènement ayant une durée faible semblable à celles des évènements D1 de la Figure 6.8a

6.3.2- Evénements D3

La répartition géographique est présentée sur la Figure 6.11 pour l'ensemble des années 2005-2010. Ces évènements sont centrés autour de l'équateur géomagnétique avec une extension en latitude qui est uniforme quelle que soit la longitude et de l'ordre de +/- 15° autour de l'équateur magnétique. Les plateaux de densité s'étendent donc au delà de la position des crêtes d'ionisation présentes de jour à cette distance de l'équateur magnétique. Les flancs des plateaux de densité sont relativement étroits, de l'ordre de quelques degrés de latitude en moyenne et ne présentent pas non plus de variations significatives suivant la longitude. L'absence totale d'évènements dans quelques secteurs très restreints de longitude est due à l'absence de données. Pour les années 2009 et 2010 où les évènements sont moins fréquents, on parvient à distinguer des maxima d'occurrence dans les secteurs de l'Afrique, de l'Asie et de l'Amérique du Sud. Cette observation nous a amenés à étudier de façon systématique la distribution en longitude de la fréquence d'occurrence des évènements ainsi

que leur position en latitude non seulement pour les évènements D3 mais aussi pour les évènements D4 et E. Nous reviendrons sur cette question au paragraphe 6.5 consacré à la synthèse et à la discussion des principaux résultats.

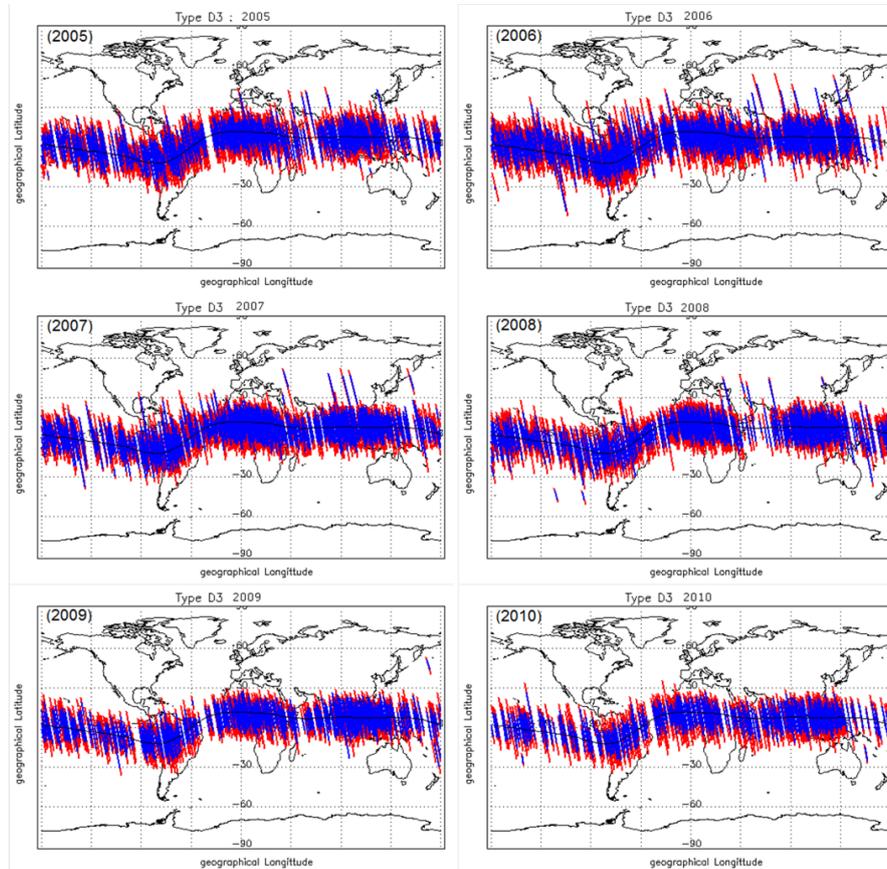


Figure 6.11. Traces des segments d'orbites pendant lesquels un évènement de type D3 est observé (années 2005 à 2010). La position du plateau, entre T_{max1} et T_{max2} , est indiqué en bleu, les flancs des perturbations, entre $T1$ et T_{max1} et T_{max2} et $T2$, sont indiqués en rouge.

6.3.3- Evénements D4

La Figure 6.12 présente pour les 6 années de fonctionnement de DEMETER les traces de tous les segments d'orbites sur lesquels un évènement de type D4 a été observé. La distribution géographique est similaire à celle des évènements D3, c'est-à-dire centrée autour de l'équateur magnétique avec une extension en latitude en moyenne de l'ordre de $\pm 15^\circ$, mais le nombre d'orbites avec évènement est beaucoup plus faible que le nombre correspondant des D3.

On distingue cependant des maxima d'occurrence dans le secteur de l'Amérique du Sud et dans le Pacifique. Ce dernier présente toujours la même dissymétrie hémisphérique au profit

de l'hémisphère Sud, marquée par une extension de certains événements à des latitudes géomagnétiques Sud de 45° à 50° , ce maximum d'occurrence dans le Pacifique se maintient pendant les années 2008-2009 de minimum d'activité solaire alors qu'il devient étonnamment très faible en 2010. Le maximum dans le secteur de l'Afrique est très atténué pendant le minimum d'activité solaire de même que celui du secteur de l'Asie.

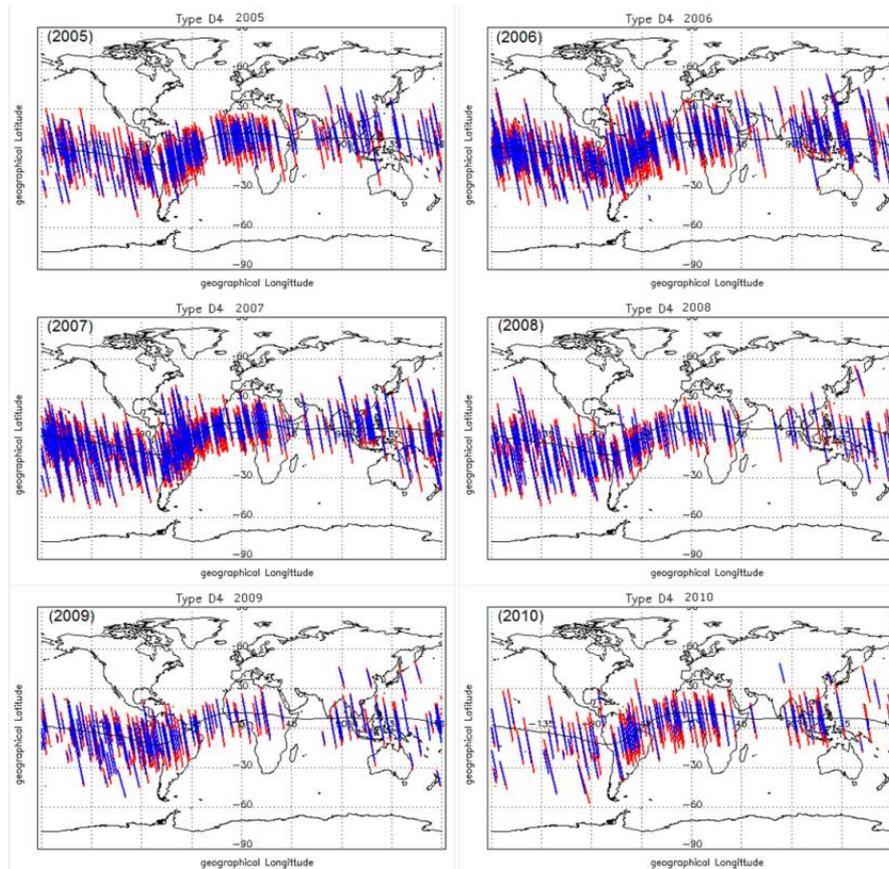


Figure 6.12. Traces des segments d'orbites pendant lesquels un événement de type D4 est observé (années 2005 à 2010). La position du plateau, entre Tmax1 et Tmax2, est indiquée en bleu, les flancs des perturbations, entre T1 et Tmax1 et Tmax2 et T2, sont indiqués en rouge.

6.3.4- Événements E, bulles de plasma équatoriales

Leur distribution géographique est représentée sur la Figure 6.12. Pendant les années de fin du cycle 23, 2005 et 2006, au cours desquelles l'activité magnétique est encore forte, on constate une distribution relativement uniforme entre les secteurs Pacifique, Amérique du Sud et Afrique mais pratiquement plus d'événements au niveau de l'Asie. Le nombre d'orbites sur lesquelles un événement est détecté diminue fortement pendant le minimum d'activité solaire puis augmente de nouveau avec le début du nouveau cycle en 2010 qui engendre un

maximum local très accentué au-dessus de l’Afrique. Comme pour les évènements D3 et D4 on remarque, dans le secteur du Pacifique, quelques évènements qui atteignent de grandes latitudes dans l’hémisphère Sud.

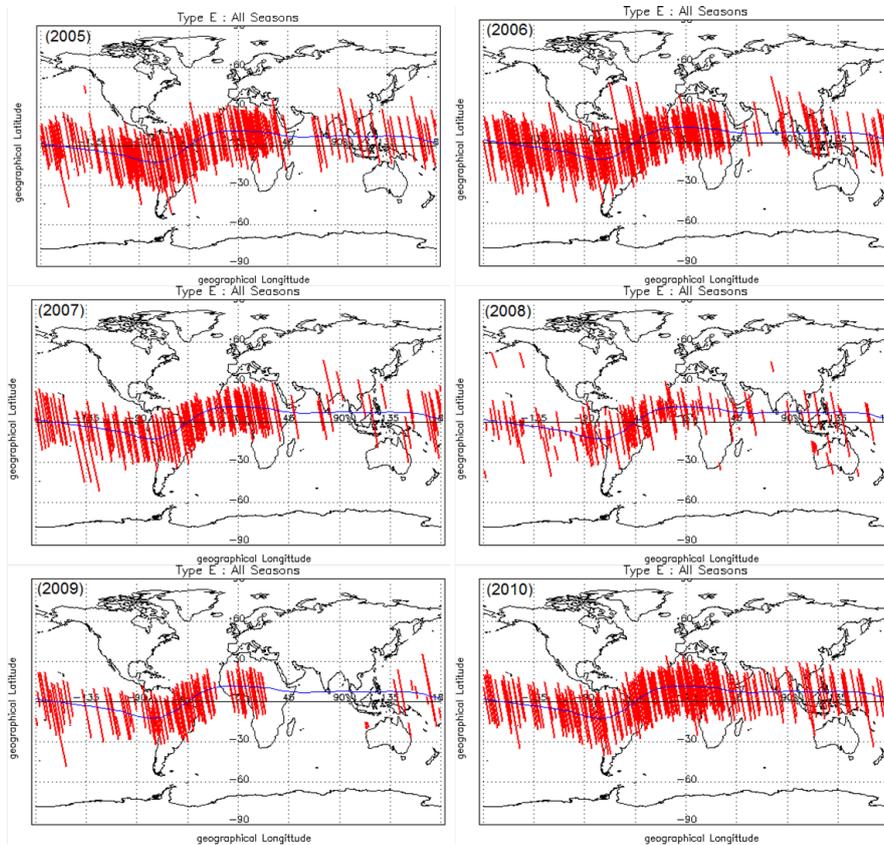


Figure 6.13. Traces des segments d’orbites pendant lesquels un évènement de type E (bulles de plasma) est observé (années 2005 à 2010). Ces perturbations de moyenne échelle se produisent en général dans un plateau à grande échelle assez semblable aux évènements D3 et D4 et qui délimite les durées d’évènements et les tracés correspondants.

6.4- Variations saisonnières et inter-annuelles

Nous nous sommes limités aux évènements D3, D4 et E les plus importants pour la dynamique de l’ionosphère de basse latitude par les échelles spatiales qu’ils recouvrent et par l’amplitude des variations correspondantes de la densité du plasma.

6.4.1- Evènements D3

Les variations saisonnières de la fréquence d’occurrence sont représentées sur la Figure 6.14a pour les années 2005 à 2010.

On constate une variation saisonnière très marquée de la fréquence d'occurrence (ou probabilité d'occurrence) des événements avec des maxima équinoxiaux, un maximum principal au printemps et un maximum plus faible en automne. En été et en hiver la probabilité d'occurrence passe par des minima, très accentués pendant les années de faible activité solaire où la fréquence d'occurrence est très faible, inférieure à 5%. D'une façon générale le minimum d'été est plus profond que le minimum d'hiver, c'est-à-dire que les événements D3 se produisent très rarement en été.

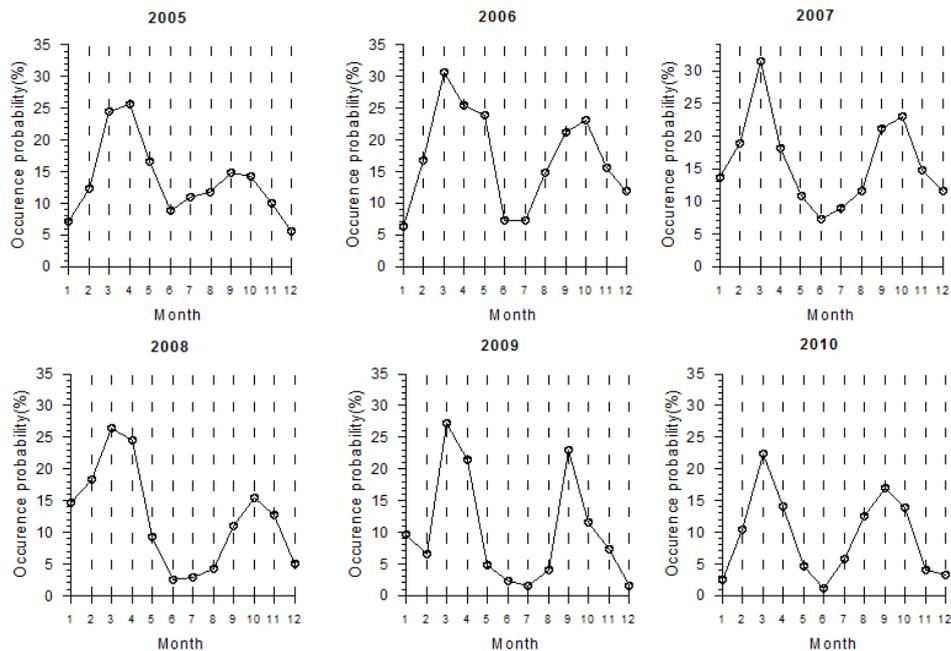


Figure 6.14.a. Variations saisonnières de la fréquence d'occurrence des événements D3

La comparaison des probabilités d'occurrence tracées sur un même diagramme pour l'ensemble des 6 années (Figure 6.14b) montre que les événements D3 sont sensiblement plus fréquents pendant les 2 dernières années modérément actives du cycle solaire 23 mais qu'on n'observe pas de variation notable entre une année encore proche du maximum d'activité solaire comme 2005 et les années 2008 et 2009 caractérisées par un minimum très profond de l'activité solaire.

La variation saisonnière des événements D3 est semblable à celle qui est observée sur l'ensemble des paramètres de l'ionosphère équatoriale comme la fréquence critique foF2 de la couche F2 (Ouattara et al., 2009 ; Pham et al., 2011) ou encore le Contenu Electronique Total (TEC) (Ouattara, 2009). Elle caractérise donc la dynamique intrinsèque de l'ionosphère équatoriale qui se maintient de façon relativement indépendante du niveau d'activité magnétique et d'activité solaire .

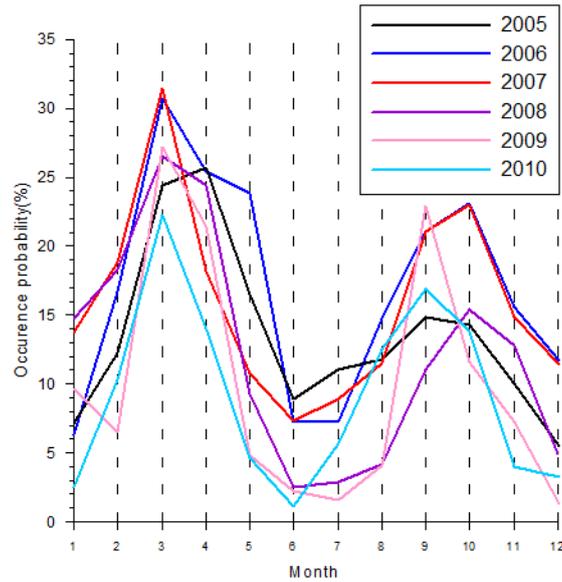


Figure 6.14b. Variations saisonnières de la probabilité d’occurrence des Type D3 de 2005 à 2010

6.4.2- Evènements D4

La Figure 6.15 qui présente pour chaque année les variations mensuelles des fréquences d’occurrence fait apparaître en 2005, année où l’activité solaire et magnétique est la plus forte au cours de la phase opérationnelle de DEMETER, des maxima équinociaux semblables à ceux des évènements D3. En 2007, des maxima relatifs sont encore visibles aux équinoxes moins accentués que ceux de 2005 parce qu’un maximum plus important est présent au solstice d’hiver. L’année 2010 est comparable mais c’est au solstice d’été qu’on trouve un maximum de même amplitude que les 2 maxima équinociaux. Pendant les années de minimum d’activité solaire on observe aussi un maximum d’occurrence au solstice d’hiver en 2008 mais ce maximum disparaît à la fin de l’année 2009. La variation saisonnière est plus complexe pour 2006, avec 2 maxima décalés d’un à deux mois en retard par rapport aux équinoxes est comparable à 2006 à l’exception d’un maximum d’été visible en juillet uniquement qu’il est tentant d’attribuer à une anomalie associée à des conditions d’activité magnétique particulières au cours de cette période. Pour ce qui est des variations saisonnières, les années 2007 et 2010 apparaissent donc comme des années de transition entre les périodes de forte activité solaire et magnétique (2005 pour le cycle 23 et les années postérieures à 2010 pour le cycle 24) et le minimum profond d’activité solaire et magnétique de 2008-2009.

Les grands différents entre certaines années ne sont pas un artefact, elles manifestent l’existence de phénomène qui change la distribution saisonnière en faisant apparaître des maxima aux solstices.

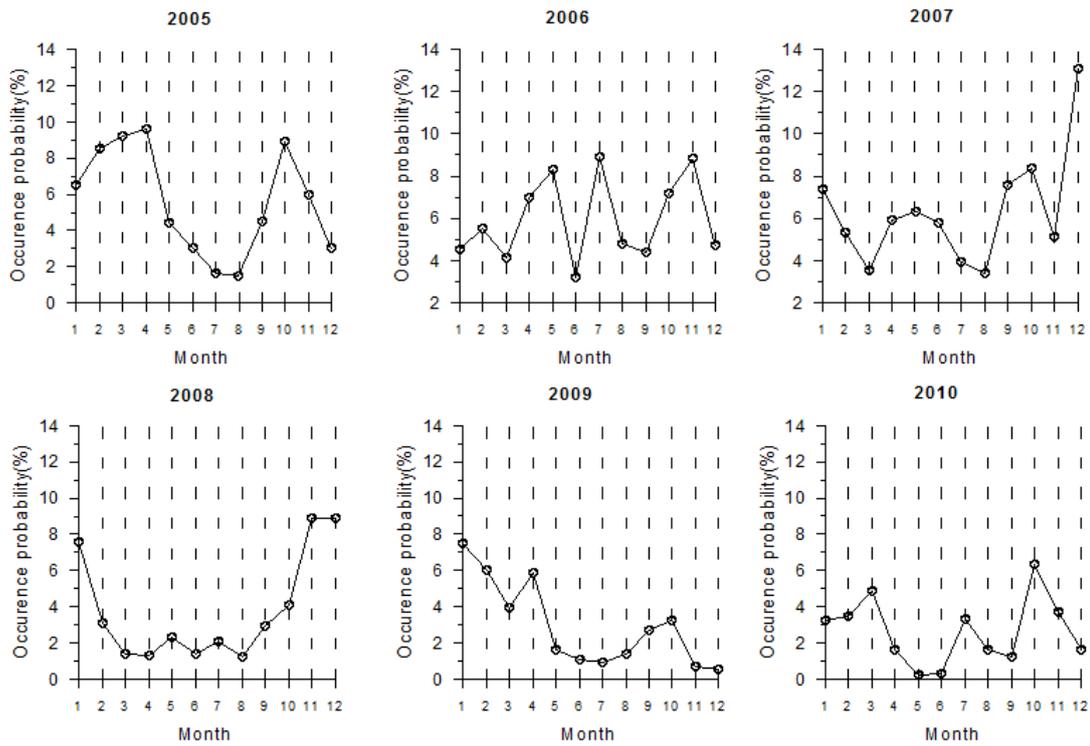


Figure 6.15. Variations saisonnières de Type D4 observés sur les probabilités d'occurrence d'évènement de 2005 à 2010

6.4.3- Evènements de type E

La Figure 6.16 présente les variations saisonnières de la probabilité d'occurrence des évènements de type E, bulles de plasma équatoriales.

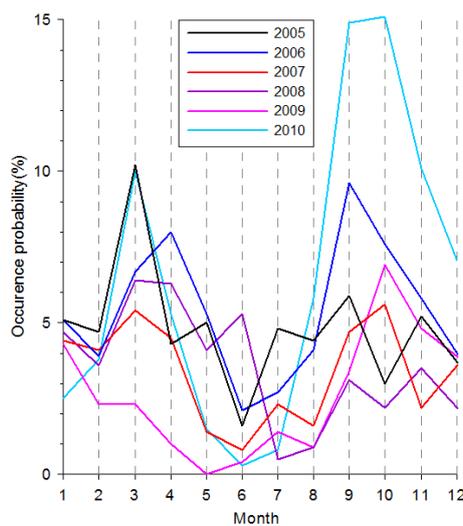


Figure 6.16. Variations saisonnières des évènements de type E.

Les bulles de plasma sont les plus fréquentes aux équinoxes indépendamment de l'activité solaire, ce qui est un fait connu. On remarquera cependant l'amplitude des maxima de l'année 2010, surtout celui d'automne, plus élevés qu'en 2005 dont le maximum d'automne est considérablement atténué, ainsi que le faible maximum de printemps de l'année 2009, du à une période prolongée d'activité magnétique très faible.

6.5- Influence de l'activité solaire et de l'activité magnétique

Les *Figures 6.17.a* à *6.17.c* représentent, en fonction de l'activité magnétique et pour chacune des 6 années, la variation de la fréquence d'occurrence des évènements D3, D4 et E. Comme précédemment on a utilisé 6 classes pour l'indice Am, et la fréquence d'occurrence est définie comme le rapport [nombre d'orbites avec évènements / nombre total d'orbites] dans chacune des classes. Les données détaillées, fournies dans les *Tableau 6.1.a* à *6.1.c* à la fin du paragraphe permettent de connaître le nombre d'orbites répertoriées dans chaque classe donc d'apprécier la signification statistique des fréquences d'occurrence calculées.

Evènements D3. Quelle que soit l'année, la fréquence d'occurrence ne montre pas de dépendance significative vis-à-vis de l'activité magnétique et ses variations relatives sont très semblables d'une année à l'autre, bien représentées par la courbe moyenne qui passe de ~ 12% pour une activité magnétique très faible ($Am < 10$) à 17% pour une activité forte ($40 < Am < 60$), soit une augmentation de la fréquence de l'ordre de ~ 40% .

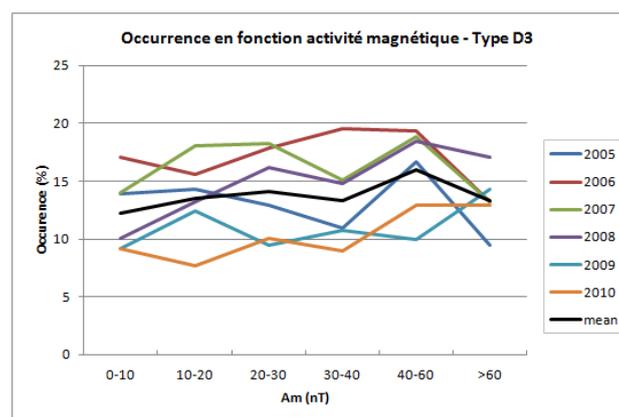


Figure 6.17.a. Fréquence d'occurrence des évènements D3 en fonction de l'activité magnétique.

Par contre, pour les activités très élevées généralement consécutives à des évènements solaires, la fréquence d'occurrence diminue très sensiblement en 2005, 2006 et 2007 alors que

cet effet n'est pas observé sur les années 2008 à 2010, 2010 ayant ainsi le même comportement que les années du minimum solaire. Ce comportement semble montrer que les conditions ionosphériques qui régissent l'occurrence des événements D3 évoluent lentement et qu'en 2010 elles étaient encore proches de celles qui prévalaient pendant le minimum d'activité solaire de 2008 et 2009.

Évènements D4. Pour toutes les années, sauf l'année 2009, la fréquence d'occurrence ne témoigne pas d'un effet systématique significatif de l'activité magnétique, car elle reste pratiquement constante ou décroît faiblement quand l'activité augmente. Au cours de la fin du cycle 23, de 2005 à 2007, les événements D4 sont plus fréquents (en moyenne $\sim 6\%$) qu'en 2008 et 2010 ($\sim 3\%$) et leur fréquence augmente aussi pour des niveaux importants d'activité magnétique. La valeur moyenne de la fréquence d'occurrence est faible en 2010, du niveau de celle de 2008, ce qui peut probablement s'expliquer, comme pour les événements D3, par une constante de temps dans l'évolution de l'ionosphère. Mais on note une augmentation de l'occurrence pour les niveaux forts d'activité semblable à celles des années de fin de cycle 23.

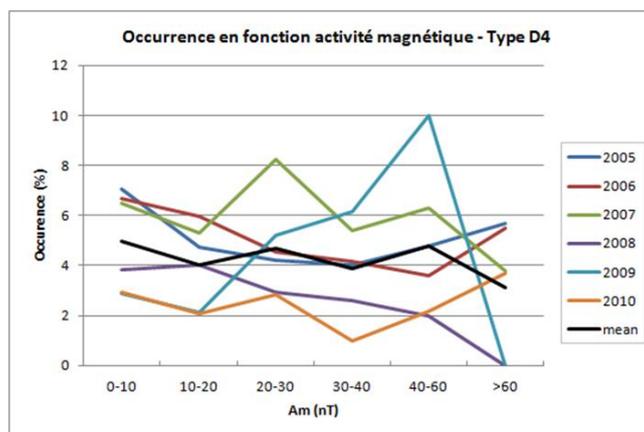


Figure 6.17.b. Fréquence d'occurrence des événements D4 en fonction de l'activité magnétique.

Le comportement anormal de l'année 2009, avec une augmentation rapide de la fréquence d'occurrence depuis les activités magnétiques faibles ($10 < A_m < 20$) jusqu'au maximum très prononcé pour une activité forte ($40 < A_m < 60$), n'est pas expliqué. Pendant le minimum solaire de 2008 et 2009 aucun événement D4 n'est observé pour les activités magnétiques très fortes ($A_m > 60$), résultat statistiquement significatif puisqu'obtenu sur 48 orbites. Ce comportement est l'opposé de celui qu'on observe pendant les années où l'activité solaire est supérieure (2005 à 2007 et 2010) où les périodes d'activité magnétique très forte correspondent à une augmentation très nette de la fréquence d'occurrence observée.

Contrairement aux évènements D3 les évènements D4 semblent donc inhibés en période de minimum d'activité solaire quand l'activité magnétique est forte.

Evènements E. La probabilité d'occurrence des évènements E, montre une dépendance très claire par rapport à l'activité magnétique pour l'ensemble des 6 années, c'est-à-dire indépendamment de l'activité solaire : elle augmente rapidement pour les 2 dernières classes d'indices Am (>40) c'est-à-dire lorsque l'activité magnétique est forte à très forte, passant de $\sim 7\%$ à $\sim 18\%$ en moyenne. Cette tendance est extrêmement marquée pour l'année 2009 et l'année 2010 de début du cycle 24 se comporte, dans le cas des évènements E, comme les années de fin du cycle 23. Cette dépendance forte à l'activité magnétique est connue et s'explique par le rôle majeur du champ électrique dans l'ionosphère équatoriale de nuit qui est intensifié au cours des sous-orages magnétosphériques qui contrôlent le niveau d'activité magnétique mesuré par Am.

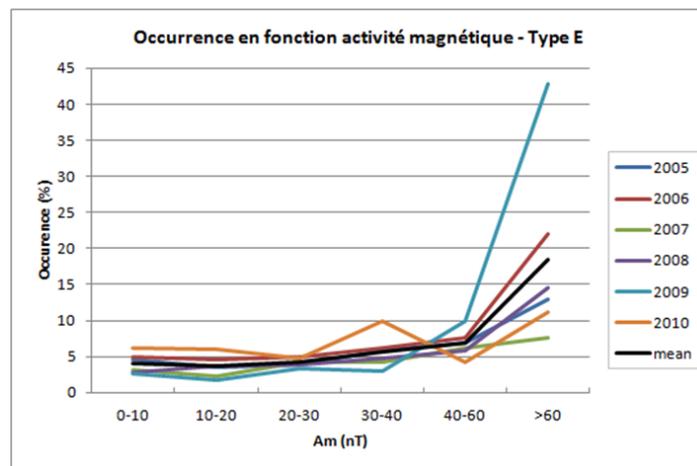


Figure 6.17.c. Fréquence d'occurrence des évènements E en fonction de l'activité magnétique.

AM (nT)	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	Total orbits	Orbit with events										
0-10	1350	188	2316	396	2613	366	2431	245	3550	327	2714	250
10-20	1124	161	1136	177	1220	220	1168	154	893	111	1008	78
20-30	686	89	508	91	557	102	545	88	211	20	318	32
30-40	374	41	241	47	278	42	230	34	65	7	100	9
40-60	336	56	222	43	191	36	152	28	20	2	93	12
>60	264	25	91	12	53	7	41	7	7	1	54	7

Tableau 6.1.a. Influence de l'activité magnétique d'événement D3, nombre d'évènements

Am(nT)	2005	2006	2007	2008	2009	2010
0-10	13.93	17.10	14.01	10.08	9.21	9.21
10-20	14.32	15.58	18.03	13.18	12.43	7.74
20-30	12.97	17.91	18.31	16.15	9.48	10.06
30-40	10.96	19.50	15.11	14.78	10.77	9.00
40-60	16.67	19.37	18.85	18.42	10.00	12.90
>60	9.47	13.19	13.21	17.07	14.29	12.96

Tableau 6.1.b. Influence de l'activité magnétique d'événement D3, occurrence (%)

AM (nT)	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	Total orbits	Orbit with events										
0-10	1350	95	2316	155	2613	170	2431	93	3550	102	2714	80
10-20	1124	53	1136	68	1220	65	1168	47	893	19	1008	21
20-30	686	29	508	23	557	46	545	16	211	11	318	9
30-40	374	15	241	10	278	15	230	6	65	4	100	1
40-60	336	16	222	8	191	12	152	3	20	2	93	2
>60	264	15	91	5	53	2	41	0	7	0	54	2

Tableau 6.2.a. Influence de l'activité magnétique d'événement D4, nombre d'évènements

Am(nT)	2005	2006	2007	2008	2009	2010
0-10	7.04	6.69	6.51	3.83	2.87	2.95
10-20	4.72	5.99	5.33	4.02	2.13	2.08
20-30	4.23	4.53	8.26	2.94	5.21	2.83
30-40	4.01	4.15	5.40	2.61	6.15	1.00
40-60	4.76	3.60	6.28	1.97	10.00	2.15
>60	5.68	5.49	3.77	0.00	0.00	3.70

Tableau 6.2 .b. Influence de l'activité magnétique d'événement D4, occurrence (%)

AM (nT)	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	Total orbits	Orbit with events										
0-10	1350	61	2316	113	2613	84	2431	67	3550	95	2714	167
10-20	1124	39	1136	53	1220	28	1168	43	893	15	1008	60
20-30	686	27	508	25	557	24	545	21	211	7	318	15
30-40	374	22	241	15	278	12	230	11	65	2	100	10
40-60	336	23	222	17	191	12	152	9	20	2	93	4
>60	264	34	91	20	53	4	41	6	7	3	54	6

Tableau 6.3.a. Influence de l'activité magnétique d'événement E, nombre d'évènements

Am(nT)	2005	2006	2007	2008	2009	2010
0-10	4.52	4.88	3.21	2.76	2.68	6.15
10-20	3.47	4.67	2.30	3.68	1.68	5.95
20-30	3.94	4.92	4.31	3.85	3.32	4.72
30-40	5.88	6.22	4.32	4.78	3.08	10.00
40-60	6.85	7.66	6.28	5.92	10.00	4.30
>60	12.88	21.98	7.55	14.63	42.86	11.11

Tableau 6.3b. Influence de l'activité magnétique d'événement E, occurrence (%)

6.6- Discussion et interprétation des observations

Nous revenons en premier lieu sur la répartition géographique des évènements de type D3 dont nous avons indiqué au paragraphe 6.3 que des maxima d'occurrence apparaissaient dans les secteurs de l'Amérique du Sud, de l'Afrique et de l'Asie du Sud-Est pendant les années 2009 et 2010. Nous avons cherché à préciser cette observation préliminaire en divisant les 360° de longitude en secteurs de 15° et en calculant pour chaque année

- (i)- le nombre total d'évènements observés dans chaque secteur
- (ii)- la moyenne des latitudes géomagnétiques de début et de fin des évènements.

La longitude d'un évènement est définie comme la moyenne des longitudes de début et de fin de l'évènement, les temps de début et de fin étant les temps T_1 et T_2 définis au paragraphe 6.2. De même la latitude de début est celle du temps T_1 et la latitude de fin celle du temps T_2 . Comme le fonctionnement de DEMETER a été pratiquement nominal au cours de la phase opérationnelle, les orbites sur lesquelles les données sont disponibles recouvrent de façon homogène l'ensemble des secteurs de longitude et la distribution du nombre d'évènements détectés peut être considérée comme représentative de la distribution en longitude de la fréquence d'occurrence. Les courbes des latitudes moyennes de début et de fin d'évènement montrent la distribution en fonction de la longitude des intervalles de latitude dans lesquels se produisent les évènements.

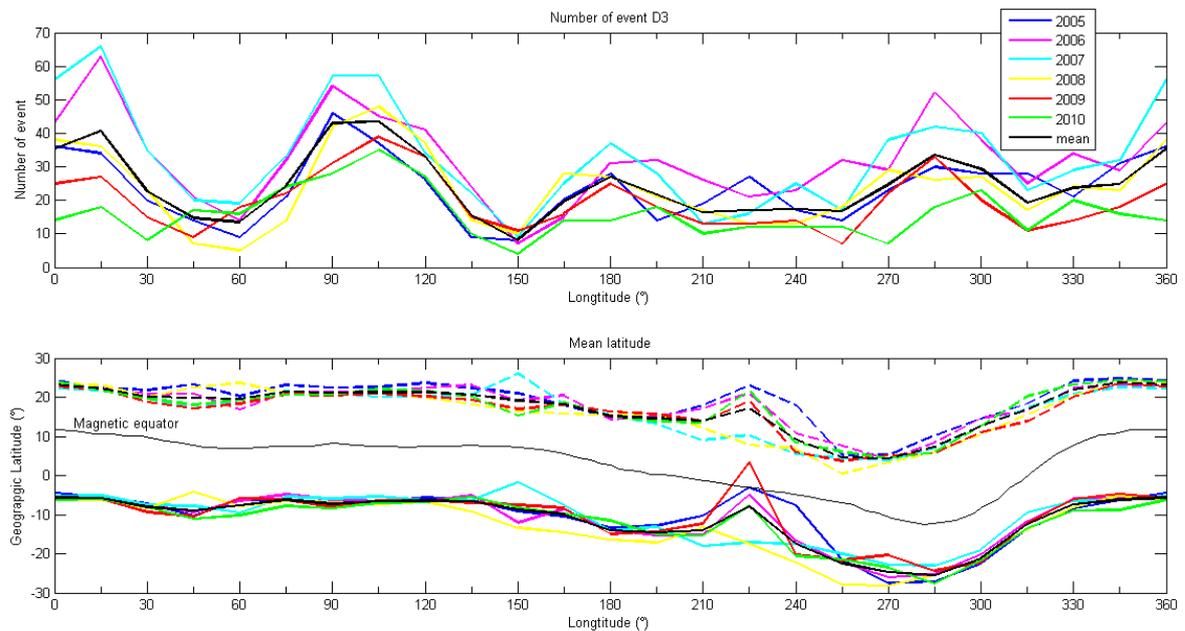


Figure 6.18. Modulation en longitude des évènements D3

La *Figure 6.18* rassemble les résultats pour les évènements D3, les différentes années étant repérées par un code couleur indiqué sur la figure. On constate que toutes les années font apparaître 4 maxima régionaux d'occurrence centrés sur les mêmes longitudes et que les valeurs des fréquences d'occurrence pour chaque secteur de longitude sont relativement homogènes d'une année à l'autre, ce qui autorise à calculer une courbe moyenne pour les 6 ans. Cette distribution moyenne en longitude représentée en noir permet de préciser la position moyenne des maxima régionaux : $\sim 10^\circ$, $\sim 95^\circ$, 180° et 285° , la largeur de chaque maximum étant de l'ordre de 30° . On retrouve ainsi pour les évènements D3 la structure stationnaire de nombre d'onde 4 (« Wave Number 4 », WN4) découverte sur les émissions OI135.6 nm par les observations des imageurs UV des satellites IMAGE et TIMED (*Sagawa et al.*, 2005 ; *Henderson et al.*, 2005). Depuis cette date, de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la dépendance de l'ionosphère équatoriale vis-à-vis de la longitude, démontrant que la structure WN4 était une caractéristique fondamentale de l'ionosphère de basse latitude dont elle contrôle l'état d'équilibre et la dynamique. On l'observe par exemple sur le TEC (*Schierless et al.*, 2008), sur la composition de l'ionosphère supérieure (*Bankov et al.*, 2009) sur l'amplitude de la vitesse de dérive verticale du plasma à l'équateur (*Hartman and Heelis*, 2007 ; *Kil et al.*, 2008) et sur l'intensité de l'électrojet équatorial (*England et al.*, 2006). En outre, un modèle de circulation générale comme le GSWM (Global Scale Wave Model, *Immel et al.*, 2006) fait apparaître 4 maxima de température dus aux marées atmosphériques à 115 km d'altitude. L'ensemble des observations et des modèles convergent pour attribuer la modulation WN4 à la propagation de marées atmosphériques d'ordre 3 qui atteignent la région dynamo de l'ionosphère, modifient le champ électrique dans la région E et aboutissent de jour à la formation de 4 maxima répartis en longitude dans l'ionosphère équatoriale par la modulation de l'effet de fontaine qui est le mode de transport dominant de l'ionosphère équatoriale de jour. La modulation longitudinale de l'occurrence des évènements D3 suivant une structure de type WN4 met ainsi en évidence que la formation du plateau de densité autour de l'équateur magnétique s'inscrit comme un aspect important de la dynamique globale de l'ionosphère de basse latitude passé jusque-là inaperçu.

Le second tracé de la *Figure 6.18* montre l'intervalle de latitude géographique dans lequel se produisent les évènements D3. Comme le laissait voir la *Figure 6.11* des évènements se produisent dans une bande de l'ordre de 10° de part et d'autre de l'équateur magnétique. Entre $\sim 200^\circ$ et 240° de longitude on observe une anomalie de petite échelle, qui déplace en moyenne les latitudes d'occurrence de plus de 15° ce qui est considérable. Ce déplacement,

très faible et à peine visible en 2007 et 2008, est important au cours des autres années et majeur en 2009. Il semblerait donc associé à la variation de l'activité solaire ou magnétique mais nous n'avons aucune idée pour l'interpréter et il est sans doute indispensable de valider cette observation surprenante par un ré-examen des données brutes.

Nous avons représenté ci-dessous *Figures 6.19* et *6.20*, les mêmes tracés que ceux de la *Figure 6.18* mais pour les événements D4 et E.

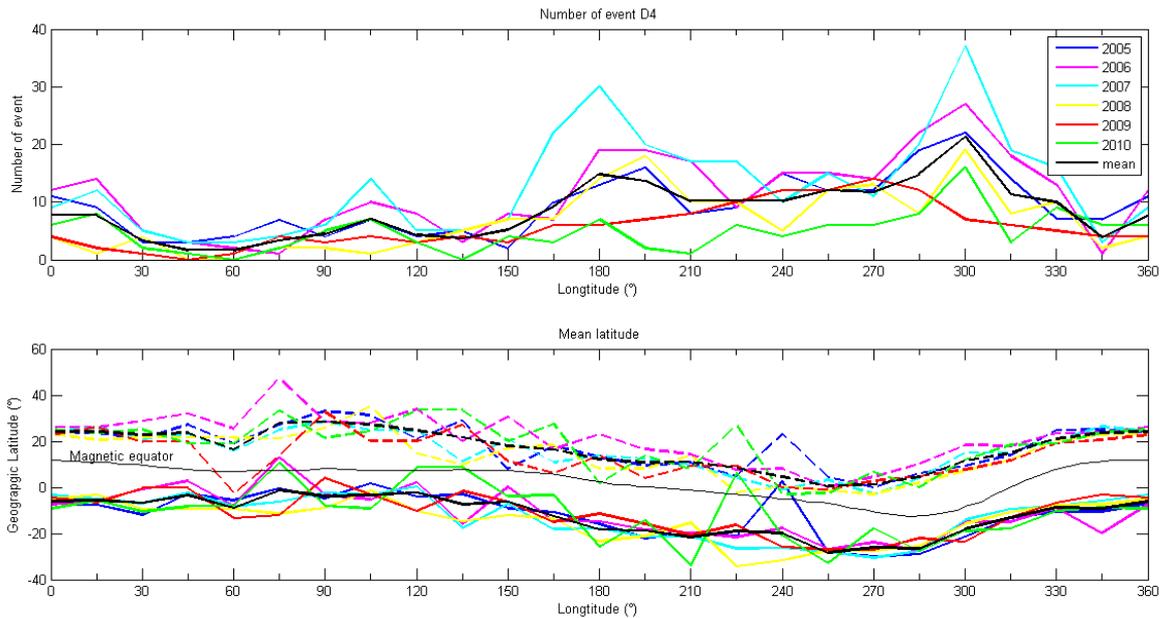


Figure 6.19. Variations en longitude de l'occurrence des événements D4

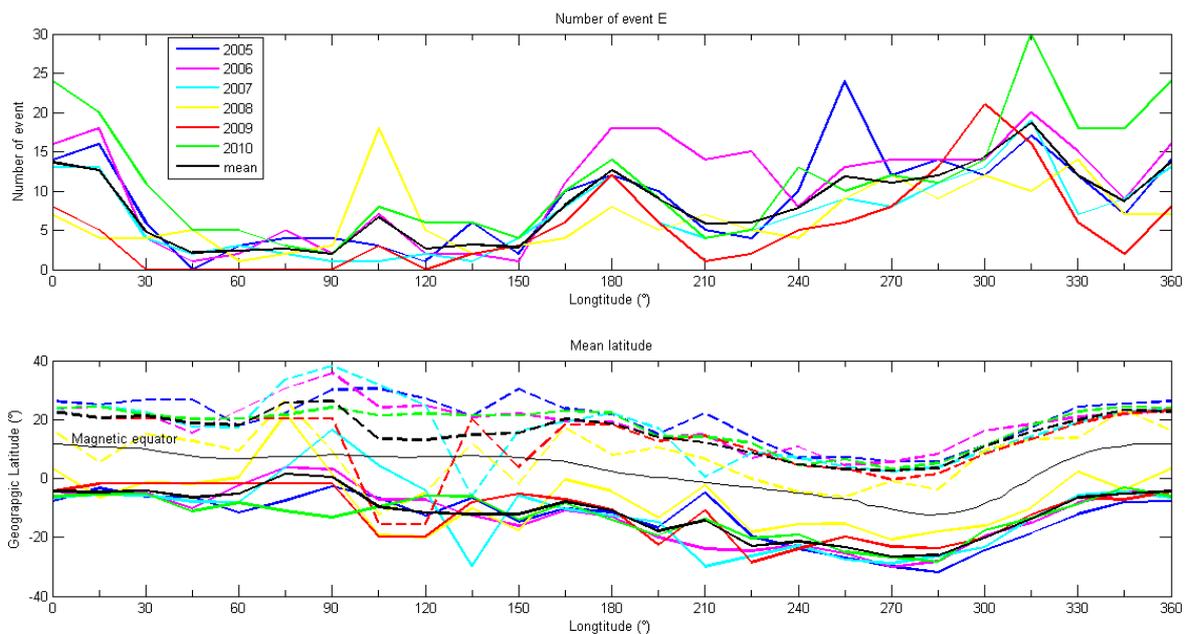


Figure 6.20. Variations en longitude de l'occurrence des événements E

Pour ce qui est des évènements D4, on ne voit pas de structure à petite échelle vers 230° comme les évènements D3 sauf pour 2005 et 2010 pendant lesquelles l'activité magnétique est assez forte.

Les tracés pour les évènements E, bulles de plasma équatoriales, sont semblables à ceux des évènements D4 pour ce qui est de la fréquence d'occurrence et de la variation de la latitude en fonction de la longitude.

Les évènements D4 et E sont régis d'une part par les processus physiques « réguliers » qui imposent la dynamique globale de l'ionosphère équatoriale et que reflètent les évènements D3 et d'autre part par d'autres mécanismes qui sont à l'origine de la formation de structures à moyenne échelle puis de leur évolution vers des états instables que constituent les bulles de plasma que nous avons classées comme évènements de type E. Ces phénomènes, intensification du champ électrique ionosphérique de nuit et/ou perturbations associées aux ondes de gravité (voir par exemple Tsunoda and White (1981), Tsunoda (1983), Tsunoda et al., (2010) et Thampi et al. (2009)), sont imposés de l'extérieur, in fine par la magnétosphère pour le champ électrique et par la basse atmosphère pour les ondes de gravité dont l'évolution est différente de celle de l'ionosphère équatoriale et vient « brouiller » les comportements propres à cette dernière.

Pour finir ce chapitre nous présentons ci-dessous brièvement un travail qui avait pour but de mettre en évidence les liens entre les 3 types principaux de perturbations de l'ionosphère de basse latitude que nous avons présentés dans ce chapitre, évènements D3, D4 et E. Ce travail a été abordé à la fin de la thèse et reste donc à développer. L'objectif était de rechercher, au moyen d'observations sur des orbites successives replacées dans le contexte de l'évolution de l'activité magnétique, comment s'organisait la séquence d'évènements. Nous pensons en effet que cette séquence peut se décrire schématiquement de la façon suivante :

- L'ionosphère de basse latitude évolue après le coucher du Soleil suivant une dynamique propre qui aboutit au développement de structures à grande échelle que sont les plateaux de densité augmentée que nous avons classés comme évènements D3. DEMETER observe ces structures vers 21.30-22.30 TL.
- En l'absence de perturbations extérieures, ces structures peuvent conserver leur morphologie et évoluer lentement au cours de la nuit. Mais des perturbations peuvent modifier la dynamique du plasma et créer dans un premier temps des structures à moyenne échelle (évènements D4) qui, ultérieurement peuvent devenir instables et

donner lieu aux bulles de plasma équatoriales (événements E) . Le mécanisme considéré comme le plus courant et le plus efficace est l'intensification du champ électrique ionosphérique dirigé vers l'Est dans l'ionosphère équatoriale de nuit. Cette intensification existe de façon régulière sous la forme du PRE (Pre Reversal Enhancement) observé au moment du coucher du Soleil mais est limité à un secteur de temps local qui est largement antérieur à celui qu'explore DEMETER. Nous pensons que la propagation à moyenne et basse latitude des champs électriques de convection de la zone aurorale intensifiés après le déclenchement des sous-orages est plus efficace pour initier la séquence d'évènements décrite ci-dessus.

Dans ce schéma extrêmement simplifié, sur un fond continu d'évènements D3, les évènements de type D4 qui pourraient se développer seraient observés préférentiellement lorsque l'activité magnétique est modérée, alors qu'une activité magnétique forte, qui témoigne de l'existence de champs électriques plus intenses en zone aurorale, conduirait du stade D3 au stade D4 qui serait déstabilisé très rapidement pour donner lieu au profils de densités instables que sont les évènements E.

Dans la *Figure 6.21* ci-dessous on a tracé sur le panneau du haut les 3 indices d'activité magnétiques Am, AE, Dst qui caractérisent respectivement l'activité globale de moyenne latitude, l'activité aurorale et l'activité équatoriale. Le panneau inférieur répertorie les évènements détectés par DEMETER sur des orbites successives, chaque orbite sur laquelle est détecté un évènement étant indiqué par un trait vertical et la nature de l'évènement par un code couleur sur la ligne horizontale correspondante. Le panneau du centre permet de trouver la longitude du nœud ascendant de chaque orbite individuelle.

On remarque un fond continu d'évènements D3 sur lequel se superposent des évènements D4 et E. Pendant les périodes où l'activité magnétique est notable (16-20 et 24-30) ce sont les évènements E qui prédominent, alors que pendant les périodes magnétiquement calmes (21-23) on observe une alternance d'évènements D4 et d'évènements E ce qui correspond à la séquence simplifiée décrite plus haut. On observe aussi que les évènements E se produisent préférentiellement dans le secteur de longitude 330° - 30° ce qui correspond approximativement à la distribution statistique indiquée sur la *Figure 6.20*.

Les figures telles que 6.21 peuvent être produites pour l'ensemble de la période opérationnelle de DEMETER et constituent un outil qui nous semble adapté à une analyse « temps réel » des séquences d'évènements et de leur relation avec l'activité magnétique.

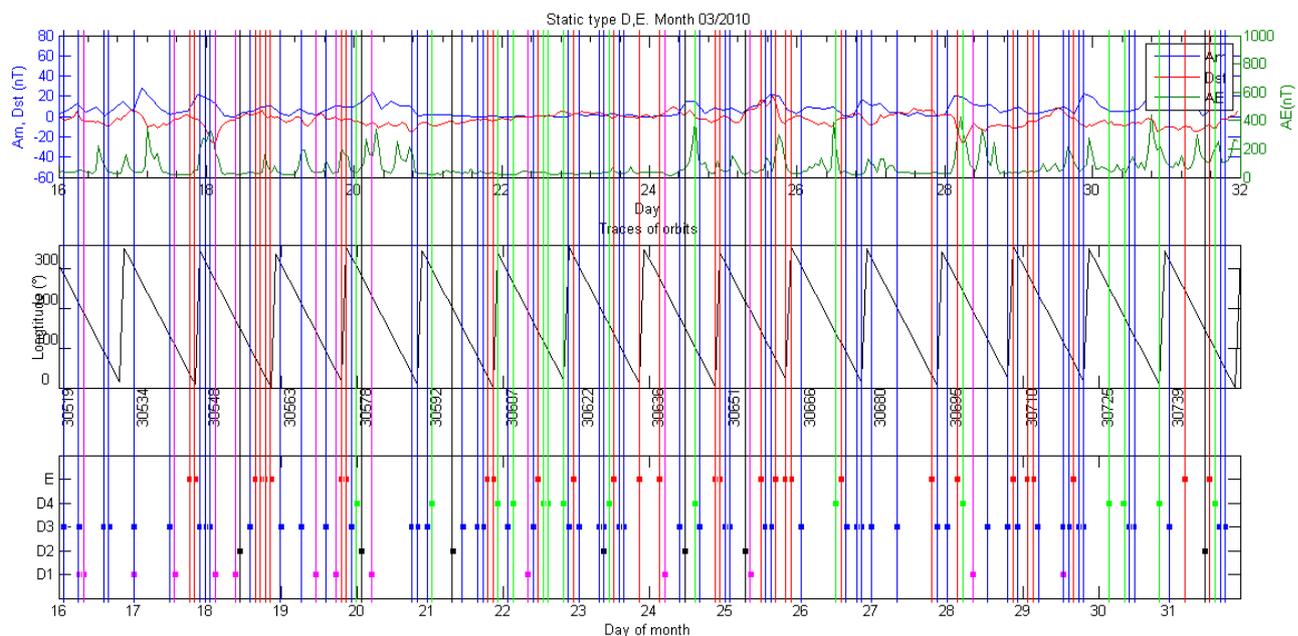


Figure 6. 21. Description temporelle des évènements détectés par DEMETER au cours de la deuxième quinzaine de Mars 2010

CONCLUSION

Au cours de cette thèse nous avons analysé les mesures de plasma obtenues par le satellite DEMETER pendant les années 2005 et 2010 sur les parties de nuit de son orbite. L'altitude du satellite, de 715 km au début de la phase opérationnelle, a été ramenée à 650 km dans le courant de l'année 2006 et le temps local des orbites est demeuré dans l'intervalle $\sim 21.30-22.30$. DEMETER, qui a fonctionné pratiquement en permanence aux latitudes inférieures à $\sim 65^\circ$ a permis d'explorer l'ionosphère supérieure au cours d'un demi-cycle d'activité solaire entre les dernières années du cycle 23 et le début du cycle 24 en 2010 en passant par le minimum de 2008-2009, le plus profond depuis un siècle.

L'objectif était d'utiliser cette base de données détaillée et couvrant une longue période pour rechercher et caractériser les perturbations régulières de l'ionosphère supérieure et les interpréter en les replaçant dans le contexte de la dynamique et de l'évolution de l'ionosphère de moyenne et basse latitude. Ce travail qui s'inscrit dans le cadre général de la « météorologie spatiale » apporte aussi une contribution à l'objectif principal de la mission DEMETER en fournissant une description détaillée des perturbations régulières de l'ionosphère qui permette de reconnaître d'éventuelles perturbations « anormales » au voisinage des grandes zones sismiques dont on pourrait, le cas échéant, rechercher une origine dans l'activité pré-sismique.

Notre travail a porté sur 2 types de perturbations : les premières, que nous avons classées comme « événements C » dans notre terminologie, sont observées très fréquemment aux latitudes moyennes mais s'étendent parfois jusque dans les régions équatoriales, les secondes, classées comme « événements D et E », sont des phénomènes typiques de l'ionosphère de basse latitude et sont observées au voisinage de l'équateur magnétique, les événements E correspondant en fait aux bulles de plasma équatoriales.

Les événements C s'apparentent à des Perturbations Ionosphériques Itinérantes de Meso-Echelle pour lesquelles nous avons jugé pratique de conserver l'acronyme anglais de MSTID. Elles sont engendrées par des ondes de gravité qui se propagent dans la haute atmosphère et interagissent avec le plasma de l'ionosphère pour créer des oscillations quasi-périodiques de la densité électronique et de la densité des ions lourds O^+ . Plus fréquentes dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord, elles ont un maximum d'occurrence au-dessus de l'Océan

Pacifique. Une partie d'entre elles sont limitées à des bande de latitudes Nord et Sud entre $\sim 40^\circ$ et 20° approximativement conjuguées, d'autres, plus rares, se propagent depuis les latitudes tropicales jusque dans l'ionosphère équatoriale. La morphologie de ces évènements est variable car ils peuvent prendre la forme de quelques augmentations successives impulsionnelles et irrégulières des densités ou celle d'un train d'onde avec de nombreuses oscillations de périodes relativement homogènes. Cette dichotomie se retrouve dans les caractéristiques des spectres calculés à partir des profils des densités le long de l'orbite, les premières donnant des fréquences caractéristiques 3 ou 4 fois plus basses que les secondes dont les fréquences sont de l'ordre de 0.015 à 0.020 Hz. Interprétées en terme de distances parcourues par le satellite pendant une période ces valeurs correspondent à des longueurs d'onde équivalentes de ~ 400 à 600 km des perturbations de l'ionosphère, caractéristiques des MSTID observées à partir des mesures au sol de TEC par les réseaux denses de GPS. Les variations saisonnières diffèrent entre les années où l'activité solaire est encore forte où les évènements sont plus fréquents au Nord comme au Sud pour les mois de juillet et aout et les années de minimum d'activité qui montrent des maxima en hiver local. Les évènements sont préférentiellement observés lorsque l'activité magnétique est faible et leur occurrence diminue lorsque l'activité augmente. Ceci semble exclure une source aurorale pour les ondes de gravité à l'origine des MSTID et favoriser par conséquent des ondes de gravité d'origine atmosphérique. L'analyse des mesures de champ électrique montre que les perturbations du plasma de l'ionosphère supérieure entraînent aussi des oscillations semblables sur le champ électrique qui peut être amplifié d'un facteur considérable par rapport au niveau ordinaires du champ d'origine dynamo pré-existant à moyenne latitude. Ceci a été abordé à la fin du chapitre consacré aux évènements C pour le cas d'une perturbation sous forme d'un train d'ondes. Les mesures de champ électrique sur un satellite non spinné comme DEMETER ont une précision limitée mais le traitement simplifié utilisé pour la perturbation choisie montre clairement que les MSTID peuvent contrôler entièrement l'électrodynamique de l'ionosphère ce qui, en retour, modifie la réponse du plasma au passage de l'onde de gravité. De nombreuses questions restent posées par ces résultats initiaux et devraient constituer des sujets prioritaires à court terme : direction de propagation des MSTID, détermination des régions sources et des conditions de propagation des ondes de gravité, analyse du couplage électrodynamique, étude des conditions de propagation des perturbations d'un hémisphère dans l'hémisphère conjugué.

Le second type d'évènement que nous avons étudié concerne l'ionosphère équatoriale se caractérise de façon générale par des augmentations de la densité du plasma avec des échelles spatiales et des morphologies variées. Les structures à moyenne échelle, quelques centaines de kilomètres d'extension le long de l'orbite au maximum, classées dans notre terminologie comme des types D1 ou D2, correspondent aux « blobs » reconnus précédemment par d'autres auteurs. Leur origine a été attribuée aux champs électriques de polarisation dans les dépressions de plasma présentes à l'équateur qui sont transmis le long des lignes de force du champ magnétique. Cette interprétation, satisfaisante pour des évènements pas trop éloignés de l'équateur, semble difficile à justifier pour un certain nombre d'entre eux visibles sur les données de DEMETER à des latitudes qui peuvent atteindre 40° à 50°. Les deux autres types d'évènements que nous avons recensés, D3 et D4, se caractérisent par des augmentations de la densité électronique et de la densité des ions lourds O⁺ sous la forme de plateaux s'étendant sur ~ 20 à 30° le long de l'orbite et sont, en moyenne, localisés de part et d'autre de l'équateur magnétique. Pour les évènements D3, les plus nombreux, les plateaux sont relativement uniformes, marqués éventuellement par une légère dépression des densités au voisinage du centre de la structure. Les évènements D4, moins nombreux, se caractérisent par la superposition sur le plateau typique des évènements D3 de dépressions de densité à moyenne échelle, ces dépressions pouvant être assez profondes, souvent un facteur 2 ou 3, et s'étendre sur quelques centaines à plus d'un millier de kilomètres. L'étude de la variation de la fréquence d'occurrence des évènements D3 en fonction de la longitude fait apparaître un résultat très intéressant : on retrouve une modulation de type onde stationnaire avec 4 maxima en longitude (l'effet « WN4 » suivant la terminologie anglo-saxonne) mise en évidence récemment sur des mesures au sol et en satellite et dont on sait maintenant qu'elle est un élément constitutif de la dynamique de l'ionosphère de basse latitude. Ceci montre que les évènements D3 sont une manifestation régulière de l'évolution diurne globale de l'ionosphère équatoriale, avec un niveau observable lorsque les conditions externes permettent de maintenir, dans le secteur de temps local de DEMETER, un champ électrique dirigé vers l'Est suffisant pour élever significativement en altitude le niveau de la région F. Le déplacement des latitudes d'occurrence des évènements D3 en fonction de la longitude reproduit sensiblement la configuration du champ magnétique et peuvent être interprétés comme une manifestation de l'effet des vents thermosphériques sur le transport du plasma dans les régions équatoriales. Sur quelques périodes de 15 jours nous avons tracé des chronogrammes qui permettent de comparer les variations de l'activité aurorale et magnétique avec

l'occurrence des événements D3, D4 et E sur les orbites de DEMETER. L'exploitation de cet outil n'a pu être que parcellaire avant la fin de la thèse et demande d'être poursuivie et améliorée. Cependant nous pensons qu'une interprétation possible des observations de ces événements est la suivante : les perturbations de type D3 traduisent l'évolution régulière de la région F supérieure équatoriale lorsqu'un champ électrique dirigé vers l'Est se maintient avec une intensité suffisante dans le secteur de temps local de DEMETER. Lorsque les conditions globales d'activité magnétique ou aurorale ou la présence d'irrégularités dans l'ionosphère (imposées par exemple par des ondes de gravité) sont telles que le transport du plasma est intensifié, les perturbations de type D3 se transforment en perturbations de type D4. Si le mouvement ascendant du plasma s'accroît, on peut alors atteindre les conditions qui vont déstabiliser l'ionosphère et conduire à l'apparition des événements de type E c'est-à-dire des bulles de plasma équatoriales.

L'examen et le traitement détaillé des observations de DEMETER sur les 6 ans de période opérationnelle nous a permis de constituer une base de données considérable et de développer des outils d'analyse efficaces. Au cours de cette thèse nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de phénomènes, montrer comment ils s'inséraient dans un cadre plus global et proposer leur interprétation. Nous espérons que l'exploitation de la base de données et des outils pourra être poursuivie dans l'avenir car elle conduira certainement à de nombreux résultats nouveaux susceptibles d'intéresser non seulement la physique de l'ionosphère, la météorologie de l'espace mais aussi la physique de l'atmosphère et des ondes de gravité.

BIBLIOPRAPHIE

Abdu, M.A., R. T. de Medeiros, J. H. A. Sobral and J.A. Bittencourt (1983), Spread F plasma bubble vertical rise velocities determined from space ionosonde observations, *J. Geophys. Res.*, 88, A11, 9197-9204.

Aggson, T.L., W.J. Burke, N.C. Maynard, W.B. Hanson, P.C. Anderson, J.A. Slavin, W.R. Hoegy and J.L. Saba (1992), Equatorial Bubbles updrafting at supersonic speeds, *J. Geophys. Res.*, 97 (A6), 8581-8590.

Bankov, L., R.A. Heelis, M. Parrot, J.J. Berthelier, P. Marinov and A. Vassileva (2009), WN4 effect on longitudinal distribution of different ion species in the topside ionosphere at low altitudes by means of DEMETER, DMSP-F13 and DMSP-F15 data, *Ann. Geophys.* 27, 2893-2902, doi:105194/angeo-27-2893-2009.

Basu, S., and S. Basu (1981), Equatorial scintillations, a review, *J. Atm. Terr. Physics*, 43, 5/6, 473-498.

Bauer S.J. (1973), *Physics of Planetary Ionospheres*, Springer-Verlag, Berlin, pp 230.

Berthelier, J.-J., M. Godefroy, F. Leblanc, E. Seran, D. Peschard, P. Gilbert and J. Artru (2006a), IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER, *Planet. Space Sci.*, 54, 5, 487-501.

Berthelier, J.-J., M. Godefroy, F. Leblanc, M. Malingre, M. Menvielle, D. Lagoutte, J.Y. Brochot, F. Colin, F. Elie, C. Legendre, P. Zamora, D. Benoist, Y. Chapuis, J. Artru and R. Pfaff (2006b), ICE the electric field experiment on DEMETER, *Planet. Space Sci.*, 54, 5, 456-471.

Brigham E.O. (1974) *The Fast Fourier Transform*, Prentice-Hall Inc, 252.

Bristow, W.A., R.A. Greenwald and J.P. Vilain (1996), On the seasonal dependence of medium-scale atmospheric gravity waves in the upper atmosphere at high latitudes, *J. Geophys. Res.*, 101, A7, 15685-15699.

Chapman, S., V.C.A. Ferraro (1931), new theory of magnetic storms, *Terr. Magn. Atm. Elec.*, 36, 77.

Chapman, S. and J. Bartels (1940), *Geomagnetism*, Oxford University Press, New York.

Cussac T., M.A. Clair, P. Ultré-Guérard, F. Buisson, G. Lasasalle-Balier, M. Ledu, C. Elisabelar, X. Passot and N. Rey (2006), The DEMETER microsatellite and ground segment, *Planet. Space Sci.*, 54, 5, 413-427.

Ding F., W. Wam, G. Xu, T. Yu, G. Yang, J. Wang (2011), Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a GPS network in central China. *J. Geophys. Res.*, 116, A09237, doi : 10.1029/2011JA016545.

England, S.L., S. Maus, T.J. Immel and S.B. Mende (2006), Longitudinal variations in the E-region electric fields caused by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21105, doi:10.1029/2006GL027465.

Fathy, I., C. Amory-Mazaudier, A. Fathy, A. M. Mahrous, K. Yumoto and E. Ghamry (2014), Ionospheric disturbance dynamo associated to a coronal hole: Case study of 5–10 April 2010, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JA019510.

Fejer, B.G., E.R. de Paula, S.A. Gonzalez and R.F. Woodman (1991), Average vertical zonal F region plasma drifts over Jicamarca, *J. Geophys. Res.*, 96, A8, 13901-13906.

Francis S.H. (1974) A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. *J Geophys. Res.*, 79, 5245-5260, doi: 10.1029/JA079i034p05245.

Frissell, N.A., J.B.H. Baker, J.M. Ruohoniemi, A.J. Gerrard, E.S. Miller, J.P. Marini, M.L. West and W.A. Bristow (2014), Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by the midlatitude Balckstone SuperDARN radar, *J. Geophys. Res.*, 10.1002/2014JA019870.

Fukushima, D., K. Shiokawa, Y. Otsuka and T. Ogawa (2012), Observation of equatorial nighttime medium scale traveling ionospheric disturbances in the 630 nm airglow images over 7 years, *J. Geophys. Res.*, 117, A10324, doi:10.1029/2012JA017758.

Galilée (1610) Lettres, voir B. Damé (1966), Galilée et les taches solaires (1610-1613), *Revue de l'histoire des sciences et applications*, 19, 4, 307-370.

Gentile, L.C., W.J. Burke and F. Rich (2006), A global climatology for equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere, *Ann. Geophys.*, 24, 163-172.

Gilbert (1600), *De Magnet*, traduit du latin en anglais par P. FleuryMottelay (1893), *William Gilbert of Colchester, on the Loadstone and Magnetic bodies and on the great magnet of the Earth*, ed. John Willey and sons, pp368.

Graham (1724), An account of observations made of the variations of the horizontal needle at London in the later part of the Year 1722 and beginning of 1723, *Phil. Trans.*, 33, 96-107, doi:10.1098/rstl.1724.0020.

Grocott A., K. Hosokawa, T. Ishida, M. Lester, S.E. Milan, M.P. Freeman, N. Sato and A.S. Yukimatu (2013), Characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed near the Antarctic Peninsula by HF radar. *J. Geophys. Res.*, 118, 5830-5841, doi : 10.1002/jgra.50515.

Hanson, W.B., D.R. Zuccaro, C.R. Lippincott and S. Sanatani (1973), The retarding potential analyzer on Atmospheric Explorer-C, *Radio Sci.*, 8, 333.

Hanson, W.B. and R.A. Heelis (1975), Techniques for measuring bulk gas motions from satellites, *Space Sci. Instrum.*, 1, 493-524.

Hartman, W.A. and R.A. Heelis (2007), Longitudinal variations in the equatorial vertical drift in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 112, A03305, doi:10.1029/2006JA011773.

Heelis, R.A. and W.B. Hanson, Measurement of thermal ion drift velocity and temperature using planar sensors (1998), in *Measurement Techniques in Space Plasmas*, ed. R.F. Pfaff, J.E. Borovsky and D.T. Young, AGU Monograph, 61-71 .

Henderson, S.B., C.M. Swenson, A.B. Christensen and L.J. Paxton (2005), Morphology of the equatorial anomaly and equatorial plasma bubbles using subspace analysis of Global Ultraviolet Imager data, *J. Geophys. Res.*, 110, A11306, doi:10.1029/2005JA011080.

Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights (1960), *Can. J. Phys.*, 38, 1441-1481.

Hocke K., K. Schlegel (1996) A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances : 1982- 1995, *Ann Geophys*, 14, 917- 940.

Hooke W.H. (1968) Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves, *J Atmos Terr Phys*, 30, 795-823.

Huba, J.D. and G. Jyo (2010), Global modeling of equatorial plasma bubbles, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L17104, doi:10.1029/2010GL044281.

Von Humbolt (1808) see *Encyclopedia of Geomagnetism and paleomagnetism*, p 403, edited by David Gubbins and Emilio Herrero-Bervera, published by Springer, PO Box 17, 3300 AA Dordrecht, the Netherlands.

Hunsuncker R.D. (1982), Atmospheric gravity waves generated in the high latitude ionosphere : A review, *Rev Geophys*, 20, 293-315.

Immel, T. J., E. Sagawa, S.L. England, S.B. Henderson, M.E. Hagan, S.B. Mende, H.U. Frey, C.M. Swenson and L.J. Paxton (2006), Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.* 33, L15108, doi:10:1029/2006GL026161.

Ishida, T., K. Hosokawa, T. Shibata, S. Suzuki, N. Nishitani and T. Ogawa (2008), SuperDARN observations of daytime MSTIDs in the auroral and mid-latitudes: possibility of long-distance propagation, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13102, doi:10.1029/2008GL034623.

Jacobs, J.A. (1991), *Geomagnetism*, Ed. Academic Press, pp806.

Jacobson, A.R. and P.A. Bernhardt (1985) Electrostatic effects in the coupling of upper atmospheric waves to ionospheric plasma, *J. Geophys. Res.*, 90, A7, 6533-6541.

Johnson F.S., W.B. Hanson, R.R. Hodges, W.R. Coley, G.R. Carignan, N.W. Spencer (1995), Gravity waves near 300km over the polar caps, *J Geophys Res*, 100, 23,993- 24,002.

Kelley, M.C. (2009), *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, Ed. Academic Press, pp 576.

Kelley M.C., M.F. Larsen, C. LaHoz and J.P. McClure (1981), Gravity wave initiation of equatorial spread F: A case study, *J. Geophys. Res.*, 86, 9087-9096.

Kelley, M.C. and C.A. Miller (1997), Electrodynamics of mid-latitude spread-F, 3, Electrohydrodynamic waves? A new look at the role of electric fields in thermospheric wave dynamics, *J. Geophys. Res.*, 102, 11,539-11,547.

Kil, H., E.R. Talaat, S.J. Oh, L.J. Paxton, L.J. England and S.Y. Su (2008), Wave structures of the plasma density and vertical ExB drift in low latitude F-region, *J. Geophys. Res.*, 113, A09312, doi:10.1029/2008JA013106.

Le, G., C.S. Huang, R.F. Pfaff, S.Y. Su, H.C. Yeh, R.A. Heelis, F.J. Rich and M. Hairston (2003), Plasma density enhancements associated with equatorial spread-F : ROCSAT and DMSF observations, *J. Geophys. Res.*, 108, 1318, doi:10.1029/2002JA009592.

Lebreton, J.P., S. Stverak, P. Travnicek, M. Maksimovic, D. Klinge, S. Merikallio, D. Lagoutte, B. Poirier, P.L. Blelly, Z. Kozacek, M. Salasquarda (2006) The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER : scientific objectives, description and first results, *Planet. Space Sci.*, 54, 5, 472-486.

Legrand, J.P. (1984), Introduction élémentaire à la physique cosmique et à la physique des relations Soleil-Terre, ed. *Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises*, pp306, ISBN:PPN 000848670.

Legrand J. P et P.A. Simon (1989), Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part I. The contributions to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind. *Ann. Geophys*, 7, (6), 565-578.

Li, Y., J.G. Luhmann , B.J. Lynch, E.K.J. Kilpua (2011), Cyclic reversal of magnetic cloud poloidal field, *Solar Phys.*, doi:10.1007/s11207-011-9722-9.

Lilensten, J. et P.-L. Blelly, *Du Soleil à la Terre, Aéronomie et météorologie de l'espace* (2000), *Collection Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier Grenoble I*, ISBN 9782868834676.

Mayaud, P.N., Analyse morphologique de la variabilité jour-à-jour de la variation journalière régulière S_R du champ magnétique terrestre, II – le système de courants C_M (régions non-polaires) (1965), *Ann. Géophys.*, 21, 514-544.

Mayaud, P. N., Une mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux (1971), *Ann, Geophys.*, 27, 71-73.

Mayaud, P. N., A hundred series of geomagnetic data, 1868-1967, (1973), *IAGA Bull.33*, Zurich, p.251.

Mayaud, P. N., Deviation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices (1980), *Geophys. Monr. Ser.*, vol.22, AGU, Washington, D.C., p.154.

Menvielle M and Marchaudon A. (2007), Geomagnetic indices, in *Solar-terrestrial physics and space weather*, J. Liliensten editor, p. 277–88, Springer.

Miller, C.A., W.E. Swartz, M.C. Kelley, M. Mendillo, D. Nottingham, J. Scali and B. Reinish (1997), Electrodynamics of midlatitude spread F, 1 Observations of unstable, gravity wave-induced ionospheric electric fields at tropical latitudes, *J. Geophys. Res.*, 102, A6, 11,521-11,532.

Miller, C.A. (1997), Electrodynamics of midlatitude spread F, 2 A new theory of gravity wave electric fields, *J. Geophys. Res.*, 102, A6, 11,533-11,538.

Miller E.S., H. Kill, J.J. Makela, R.A. Heelis, E.R. Talaat and A. Gross (2014), Topside signature of medium scale traveling ionospheric disturbances, *Ann. Geophys.* 32, 959-965, doi:10.5194/angeo-32-959-2014.

Moffat-Griffin, T., R.E. Hibbins, M.J. Jarvis and S.R. Colwell (2011), Seasonal variations of gravity wave activity in the lower stratosphere over an Antarctic Peninsula station, *J. Geophys. Res.*, 116, D14111, doi:10.1029/2010JD015349.

Oliveira, A.B.V., and F. Walter (2005), Ionospheric equatorial anomaly studies during solar storms, *Proc. XXVIIIth URSI General Assembly*, New Delhi.

Onishi, T., T. Tsugawa, Y. Otsuka, J.J. Berthelier and J.P. Lebreton (2009), First simultaneous observations of day-time MSTIDs over North America using GPS-TEC and DEMETER satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11808, doi:10.1029/2009GL038156.

Onishi, T., T. Tsugawa, Y. Otsuka and J.J. Berthelier (2012), Simultaneous observations of daytime MSTIDs by DEMETER satellite and GPS-TEC (2012), *IPSL Workshop "From the Stratosphere to the Ionosphere"*, Paris, France, November 2012;

- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa and P. Wilkinson (2004), Geomagnetic conjugate observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude using all-sky airglow imagers, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15803, doi:10.1029/2004GL0202262.
- Ouattara, F., C. Amory-Mazaudier, R. Fleury, P. Lassudrie-Duchesne, P. Vila and M. Petitdidier (2009), West African equatorial ionospheric parameters climatology based on Ouagadougou ionosonde data from June 1966 to February 1998, *Ann. Geophys.*, 27, 2503-2514.
- Ouattara, F. (2009) Contribution à l'étude des relations entre les deux composantes du champ magnétique olaire et l'ionosphère équatoriale, *PhD dissertation* (Thèse d'Etat), Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 3 Octobre 2009.
- Park, J., K.W. Min, J.J. Lee, H. Kil, V.P. Kim, H.J. Kim, E. Lee and D.Y. Lee (2003), Plasma blob events observed by KOMPSAT-1 and DMSP F 15 in the low latitude nighttime ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2114, doi:10.1029/2003GL018249.
- Park, J., C. Stolle, H. Lühr, M. Rother, S.Y. Su, K.W. Min and J.J. Lee (2008), Magnetic signatures and conjugate features of low latitude plasma blobs as observed by the CHAMP satellite, *J. Geophys. Res.*, 133, A09313, doi:10.1029/2008JA013211.
- Pham H. Thi Thu, C. Amory-Mazaudier, and M. Le Huy (2011), Time variations of the ionosphere at the northern tropical cres of ionization at Phu Thuy, Vietnam, *Ann. Geophys.*, 29, 197-207.
- Pitteway M.L.V. and C.O. Hines (1965), The reflection and ducting of atmospheric acoustic-gravity waves, *Can. J. Phys.*, 43, 2222-2243.
- Richmond A., Ionospheric Electrodynamics, *Hanbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol II, Chapter 9, 249-280, Ed by Hans Volland, 1995.
- Rishbeth, H. and O.K. Garriott (1969), Introduction to Ionospheric Physics, *International Geophys. Ser.*, 14, Ed Academic Press, pp344, ISBN 0125889402.
- Sagawa, E., T.J. Immel, H.U. Frey and S.B. Mende (2005), Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by the IMAGE/FUV, *J. Geophys. Res.*, 110, A11302, doi:10/1029/2004JA010848.
- Saito A., T. Iyemori, M. Sugiura, N.C. Maynard, T.L. Aggson, L.H. Brace, M. Takeda and M. Yamamoto (1995), Conjugate occurrence of the electric field fluctuations in the nighttime midlatitude ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 100, 21439-21451.
- Saito A., S. Fukao and S. Miyazaki (1998), High resolution mapping of TEC perturbations with GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3079-3082, doi :10.1029/98GL52361.

Saito, A. et al. (2001), Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 689-692.

Sardul S., F.F Johnson and R.A Power (1997), Gravity wave seeding of equatorial plasma bubbles, *J. Geophys. Res.*, 102, A4, 7399–7410.

Scheiner, C., (1612) Three letters on solar spots and (1630) *Rosa Ursina pp429*, doi:0.3931/e-rara-556.

Schwabe, S. H. (1844), Discovery of the sunspot cycle, *Astronomische Nachrichten*, 21, 233-234.

Shierless, L., D.C. Thompson and R.W. Schunk (2008), Longitudinal variability of low-latitude total electron content: tidal influences, *J. Geophys. Res.*, 113, A01311, doi:10.1029/2007JA012480.

Shimeis, A., I. Fathy, C. Amory-Mazaudier, R.Fleury, A.M. Mahrous, K. Yumoto and K.Groves (2012), Signature of the Coronal Hole on near the North Crest Equatorial Anomaly over Egypt during the strong Geomagnetic Storm 5th April 2010, *J. Geophys. Res.*, Vol 117, A07309, doi:10.1029/2012JA0117753.

Shiokawa K., C. Ihara, Y. Otsuka and T. Ogawa (2003a), Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using mid-latitude airglow images, *J Geophys Res*, 108 (A1),1052, doi : 10.1029/2002JA009491.

Shiokawa K., C. Ihara, Y. Otsuka, T. Ogawa, F.J. Rich (2003b), Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using mid-latitude airglow images, *J. Geophys. Res.*, 108 (A1),1145, doi : 10.1029/2002JA009639.

Shiokawa, K. et al., Geomagnetic conjugate observations of night-time medium scale and large scale traveling ionospheric disturbances: FRONT3 campaign (2005), *J. Geophys. Res.*, 110, A05303, doi:10.1029/2004JA010845.

Taori, A. J.J. Makela and M. Taylor (2010), Mesospheric wave signatures and equatorial plasma bubbles, a case study, *J. Geophys. Res.*, 115, A06302, doi:10.1029/2009JA015088.

Testud, J., P. Amayenc and M. Blanc (1975), Middle-latitude effects of auroral disturbances from incoherent scatter, *J. Atmos. Terr. Phys.*,37, 989-1010.

Thampi S V, M. Yamamoto, R.T. Tsunoda, Y. Otsuka, T. Tsugawa, J. Uemoto and M. Ishii (2009), First observations of large- scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacon on the C/NOFS satellite, *Geophys. Res. Lett.*, 36 L18111, doi: 10.1029/2009GL039887.

Triplet, G., et J-P. Roche (1996), *Météorologie Générale*, ed *La Documentation Française*, pp317, ISBN:2-11-085176-7.

Tsugawa T., Y. Otsuka, A.J. Coster and A. Saito (2007), Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over USA, *Geophys Res Lett*, 34, L22101, doi : 10.1029/2007GL031663.

Tsunoda, R.T. and B.R. White (1981), On the generation and growth of equatorial backscatter plumes, 1, Wave structure in the bottomside F layer, *J. Geophys. Res.*, 86, 3610.

Tsunoda, R.T. (1983), On the generation and growth of equatorial backscatter plumes, 2, Structuring of the west walls of upwelling, *J. Geophys. Res.*, 88, 4869.

Tsunoda R.T., D. M. Bubenik, S. V. Thampi and M. Yamamoto (2010), On large-scale wave structure and equatorial spread without a post-sunset rise of the F layer, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L07105, doi:10.1029/2009GL042357.

Vidal-Madjar, D. (1978a), Gravity waves in the lower thermosphere with the French incoherent scatter facility, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 40, 685-689.

Vidal-Madjar, D. (1978b), Les ondes de gravité de moyenne échelle dans la thermosphère: étude expérimentale et théorie de leur propagation et de leur production par le jet-stream de la tropopause, *Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris 6*, 5 Octobre 1978.

Vidal-Madjar, D., F. Bertin et J. Testud (1978), Sur le jet-stream de la tropopause en tant que source des ondes de gravité observées dans la thermosphère, *Ann. Geophys.*, 34, 1-7, 1978.

Woodman, R.F. and C. La Hoz (1976), Radar observations of F region equatorial irregularities, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/JA081i031p05447.

Zerbo, J.-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara (2012), Geomagnetism during solar cycle 23: characteristics, *J. Adv. Res.*, 4(3), 265-274, doi:10.1016/j.jare.2012.08.010.