

Détection et reconnaissance automatiques des ondes plasma à partir des mesures de DEMETER : résultats initiaux d'une étude statistique de la turbulence électrostatique et des phénomènes associés.

Automatic detection and recognition of plasma waves from DEMETER measurements: initial results from a statistical analysis of electrostatic turbulence and related phenomena.

Tatsuo ONISHI and Jean-Jacques BERTHELIER***

* LATMOS, 4 Avenue de Neptune, 94100 SAINT-MAUR, FRANCE, tatsuo.onishi@latmos.ipsl.fr

** LATMOS, 4 Avenue de Neptune, 94100 SAINT-MAUR, FRANCE, jean-jacques.berthelier@latmos.ipsl.fr

Mots Clés: Ondes plasma, Ionosphère, Turbulence électrostatique, Emetteurs TBF

Key words: Plasma waves, Ionosphere, Electrostatic turbulence, VLF transmitters

Résumé

Cette présentation est fondée sur les résultats initiaux d'un travail en cours au LATMOS sur l'analyse automatique des mesures des composantes électriques des ondes plasma TBF observées par l'expérience ICE sur DEMETER. L'objectif est de reconnaître sur les données spectrales, les différentes catégories d'ondes naturelles et artificielles et de déterminer leurs caractéristiques principales. Nous présentons des résultats préliminaires concernant l'intensité de la turbulence électrostatique et sa distribution en latitude en fonction de l'activité magnétique. Nous discutons également la corrélation entre la turbulence électrostatique et les caractéristiques des signaux d'émetteurs TBF. Les résultats de ce travail seront utilisés pour différentes études statistiques appliquées à la météorologie spatiale et pour la recherche d'émissions éventuellement associées à l'activité sismique.

This presentation is based on the preliminary results from the work in progress at LATMOS on the automatic analysis on the electric field components of VLF plasma waves observed by the ICE experiment on DEMETER satellite. The objective is to recognize, on the power spectral data, different categories of natural and man-made waves and to detect their important characteristics. In this presentation, we will discuss the results obtained from statistical studies on the latitudinal limits of the occurrence of electrostatic turbulences as a function of magnetic activity. We will also discuss the correlation between the electrostatic turbulence and the characteristics of VLF transmitter signals. Results of this work will be applied to various statistical studies in space weather and to the search of possible emissions associated with seismic activity.

Introduction

Cette présentation est fondée sur les résultats initiaux d'un travail en cours au LATMOS sur l'analyse automatique des mesures des composantes électriques des ondes plasma TBF observées par l'expérience ICE sur DEMETER. L'objectif est de reconnaître sur les données spectrales, les différentes catégories d'ondes naturelles et artificielles et de déterminer leurs caractéristiques principales. Les résultats de ce travail seront ensuite utilisés pour différentes études statistiques et pour la recherche d'émissions éventuellement associées à l'activité sismique.

1. Observations et traitement des données.

Les mesures des composantes électriques des ondes dans le domaine TBF sont fournies de façon quasi continue par l'expérience ICE à bord de DEMETER depuis Septembre 2004. Plusieurs objectifs scientifiques de la mission DEMETER nécessitent une analyse statistique détaillée et précise des ondes détectées à moyenne et basse latitude afin de pouvoir distinguer les différents types d'émissions (souffle plasmasphérique, turbulence électrostatique, sifflements, émetteurs TBF) visibles sur la Figure 1, et déterminer dans chaque cas les caractéristiques principales telles que la gamme de fréquence et le spectre, la puissance totale etc... Etant donné le très grand volume de données accumulées au cours de la vie du satellite ce travail de reconnaissance automatique apparaît indispensable pour déterminer de façon précise la distribution statistique des paramètres représentatifs des émissions. Les applications potentielles que nous envisageons sont multiples et concernent

aussi bien les études de météorologie spatiale et des couplages entre phénomènes météorologiques et ionosphériques que la recherche d'anomalies éventuelles qui pourraient être associées à l'activité sismique.

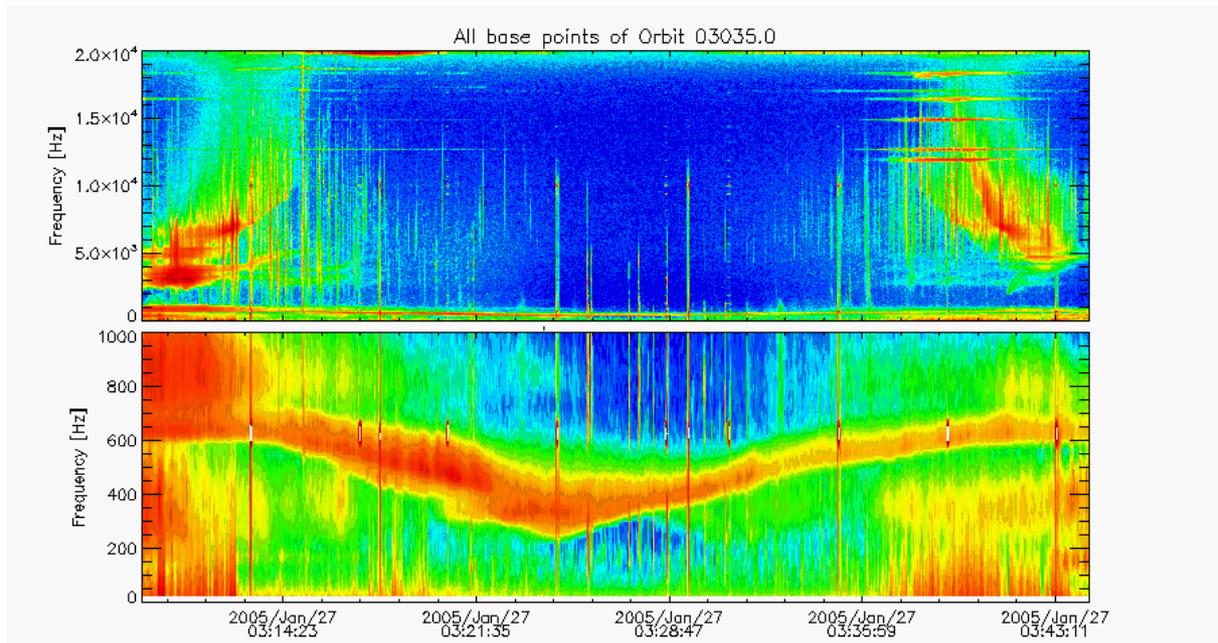


Figure 1 : Demi-orbite de jour 3035_0 dans le domaine TBF jusqu'à 20kHz (panneau supérieur) et EBF jusqu'à 1kHz (panneau inférieur). Les principales émissions visibles sur ces spectres sont la turbulence électrostatique (au dessous de ~300 Hz), le souffle (jusqu'à ~ 2 kHz à moyenne latitude et 7 à 8 kHz à haute latitude), et les émetteurs TBF (plusieurs fréquences constantes entre 10 et 20 kHz)

Les développements initiaux ont porté en priorité sur l'analyse des spectres TBF obtenus sur les demi-orbites de jour (~ 10.30 TL) en raison de la présence régulière des émissions très structurées du souffle plasmasphérique, souvent sous ses deux polarisations, et, simultanément, de la moins grande occurrence de sifflements intenses associés aux orages au voisinage de la trace de l'orbite qui, de nuit par exemple, peuvent complètement masquer les autres émissions (Figure 2). Dans une première partie nous présentons le principe de la méthode de traitement et les algorithmes associés en utilisant un certain nombre de résultats pour illustrer les fonctionnalités et les performances du traitement. Dans le domaine EBF on a porté une attention particulière à la détection et l'élimination des signaux parasites qui, malgré leur faible niveau sur DEMETER, peuvent néanmoins être une source d'erreur ou d'incertitude importante pour la détection de la turbulence électrostatique de très faible intensité qui pourrait être associée à l'activité sismique.

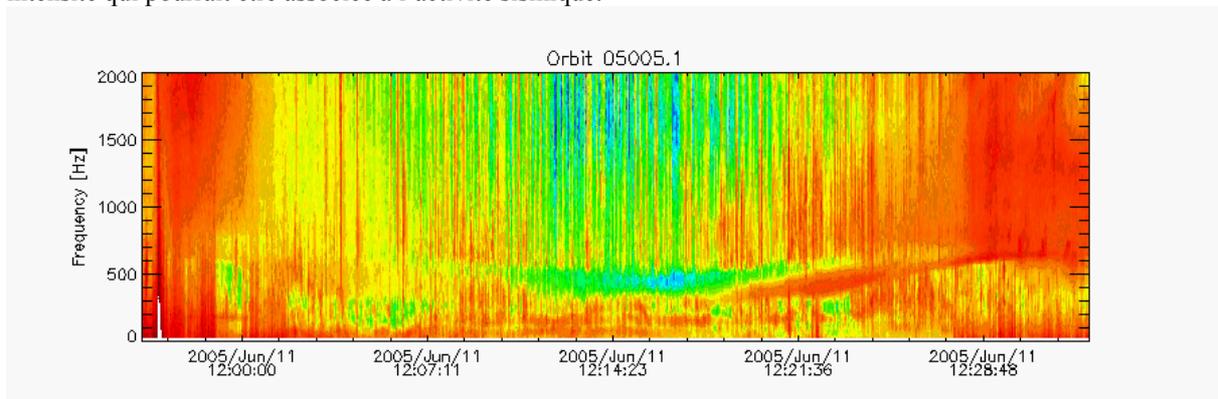


Figure 2 : Demi-orbite de nuit (5005_1) dominée par les sifflements intenses.

2. Méthode automatique de détection et reconnaissance des émissions naturelles et artificielles

Les spectrogrammes fournis par DEMETER dans le domaine TBF couvrent la gamme 19,53 Hz-20 kHz sur 1024 points avec une résolution en fréquence de 19.53 Hz. L'objectif de la méthode de traitement que nous avons développée est de représenter le spectre de façon suffisamment précise par approximation linéaire entre un nombre très restreint de points. On traite la forme d'un spectre géométriquement en utilisant les notions d'« angles » et de « distances » entre le spectre et son approximation linéaire pour définir les points caractéristiques du spectre qui permettent de reproduire correctement sa forme. Le premier avantage de cette méthode est de comprimer considérablement l'information spectrale puisque, pour une demi-orbite de jour, le nombre de points caractéristiques est compris entre 40 et 100, équivalent à 5~10% de la donnée originale, ce qui facilite le traitement statistique des grandes bases de données disponibles. Deuxième avantage, les points caractéristiques sont représentatifs des émissions présentes dans le spectre et on peut facilement sélectionner un sous-ensemble restreint de points caractéristiques pour étudier une émission particulière. La présentation détaillée de cette méthode n'est pas l'objet de cette présentation, un rapport technique étant en cours de finalisation pour soumission aux Notes du Pôle de Planétologie de l'IPSL.

La plupart des phénomènes intéressants concernent le domaine EBF, au-dessous de 1000Hz, correspondant aux 50 premiers points fréquence, domaine dans lequel on impose une précision de l'approximation linéaire plus élevée que celle imposée à plus haute fréquence. Dans le domaine TBF, les principales émissions sont les sifflements, le souffle qui recouvre une large bande de fréquence jusqu'à 5 à 7 kHz à haute latitude et les signaux des émetteurs TBF. Les sifflements, sporadiques et relativement peu fréquents de jour, sont détectés et les spectres correspondants supprimés pour permettre une bonne caractérisation du souffle et des émetteurs TBF. Dans la gamme de fréquence où on observe le souffle, les spectres peuvent être fortement lissés car la variation en fréquence est lente. En ce qui concerne les émetteurs ils sont reconnus en se fondant sur la variation du rapport signal/bruit au voisinage des fréquences connues. On a représenté sur la Figure 3 les points caractéristiques obtenus par ce traitement pour la demi-orbite 3035_0. Les points noirs et gris correspondent respectivement aux dérivées secondes négatives (au niveau des maxima des émissions) et positives (piéd des pics). On peut constater que les spectres sont bien caractérisés. La gyrofréquence des H⁺ est indiquée en blanc. Pour prendre un exemple simple, on peut repérer le souffle EBF ordinaire en recherchant le point caractéristique proche de la gyrofréquence qui correspond à la fréquence de crossover puis, par continuité déduire des points caractéristiques voisins la gamme de fréquence, la puissance etc...des émissions de souffle.

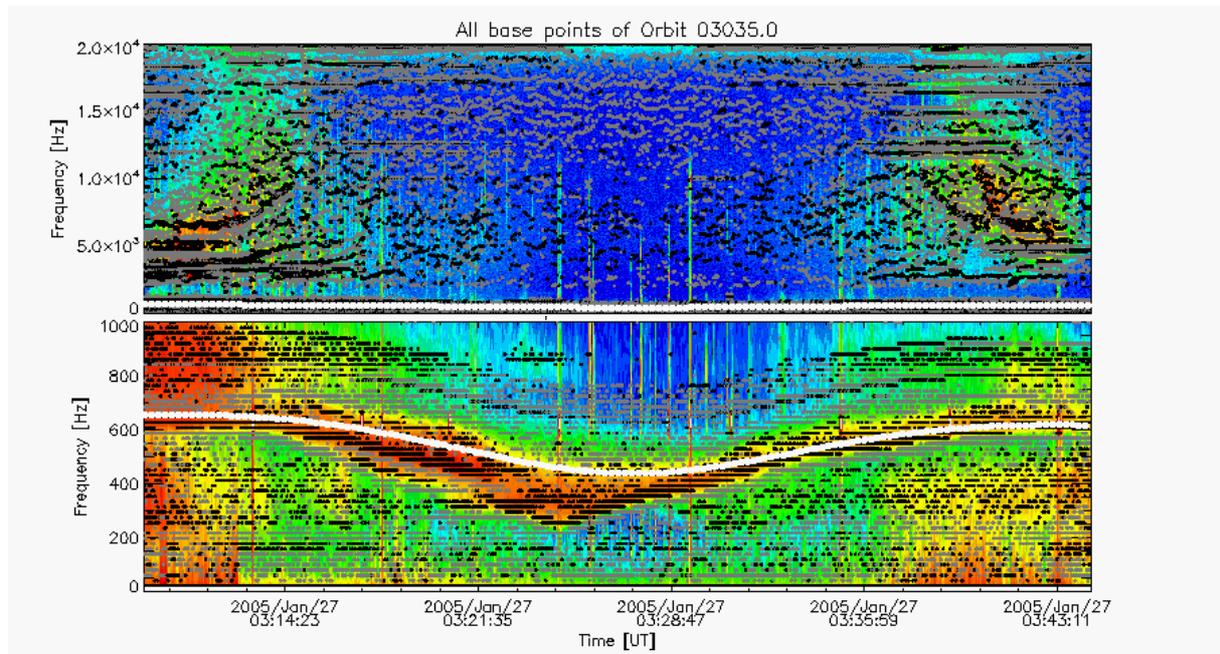


Figure 3 : Points caractéristiques obtenus sur la demi-orbite 3035_0. La gyrofréquence de H⁺ est indiquée en blanc

3. Résultats initiaux sur la turbulence électrostatique et les émetteurs TBF

3.1. Sélection de donnée : demi-orbites de jour

Dans ce paragraphe nous donnons un exemple d'application de notre méthode à une étude statistique pour la recherche d'une anomalie effectivement associée au grand tremblement de terre de Sichuan du 12 mai 2008. Dans ce but, nous avons sélectionné les demi-orbites de jour, qui passent dans le secteur longitudinal de Sichuan entre 85 et 115 degrés comme indiqué dans la Figure 4 pendant la période de janvier 2005 à mai 2008.

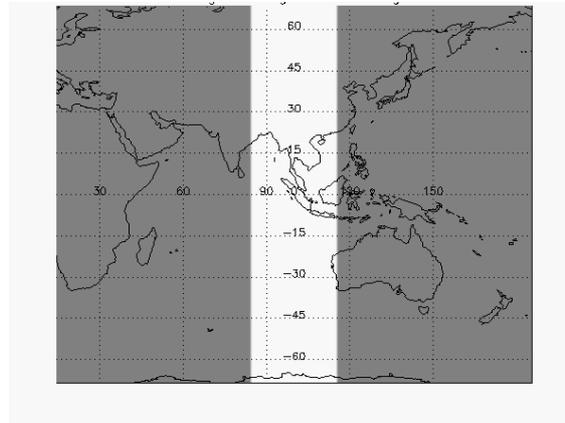


Figure 4 : Région du Sichuan sélectionnée pour une étude statistique entre janvier 2005 et mai 2008.

3.2. Turbulence Electrostatique

Une des premières études conduite à partir des résultats du traitement porte sur la turbulence électrostatique. Ces émissions quasi-statiques sont engendrées par un certain nombre d'instabilités, en particulier, à moyenne latitude, par l'instabilité de dérive de gradient, et sont associées à des irrégularités du plasma qui sont susceptible d'avoir un effet significatif sur la propagation des ondes radio. Les résultats que nous présentons concernent l'un des objectifs initiaux qui était d'étudier la distribution statistique de la turbulence électrostatique en la caractérisant par son extension en latitude et en longitude, son intensité et ses propriétés spectrales. Ce travail a permis, entre autres, de caractériser la frontière sub-aurorale au-delà de laquelle sont observés régulièrement des événements assez intenses et qui pourrait être associée à la limite vers les basses latitude de la convection aurorale.

La détection et la reconnaissance de la turbulence électrostatique sont réalisées en prenant en compte la pente du spectre aux basses fréquences, négative dans le cas de la turbulence, et en s'appuyant sur les mesures magnétiques pour éliminer les signaux électromagnétiques associées aux sifflements (voir le cas de ces émissions sur la Figure 5 vers 03.41.00 TU par exemple). La turbulence peut-être caractérisée par plusieurs paramètres, puissance totale, indice de la loi de puissance... Dans ce qui suit nous avons choisi un paramètre simple et représentatif, la puissance à 20Hz qui fournit un bon estimateur de l'intensité totale de la turbulence électrostatique. Ce paramètre est indiqué dans le panneau supérieur de la Figure 5. Une étude de plusieurs cas a permis de mettre en évidence que la turbulence électrostatique intense associée à la convection aurorale est caractérisée par une puissance supérieure à $1 \mu\text{V}^2/\text{m}^2/\text{Hz}$ à 20 Hz.

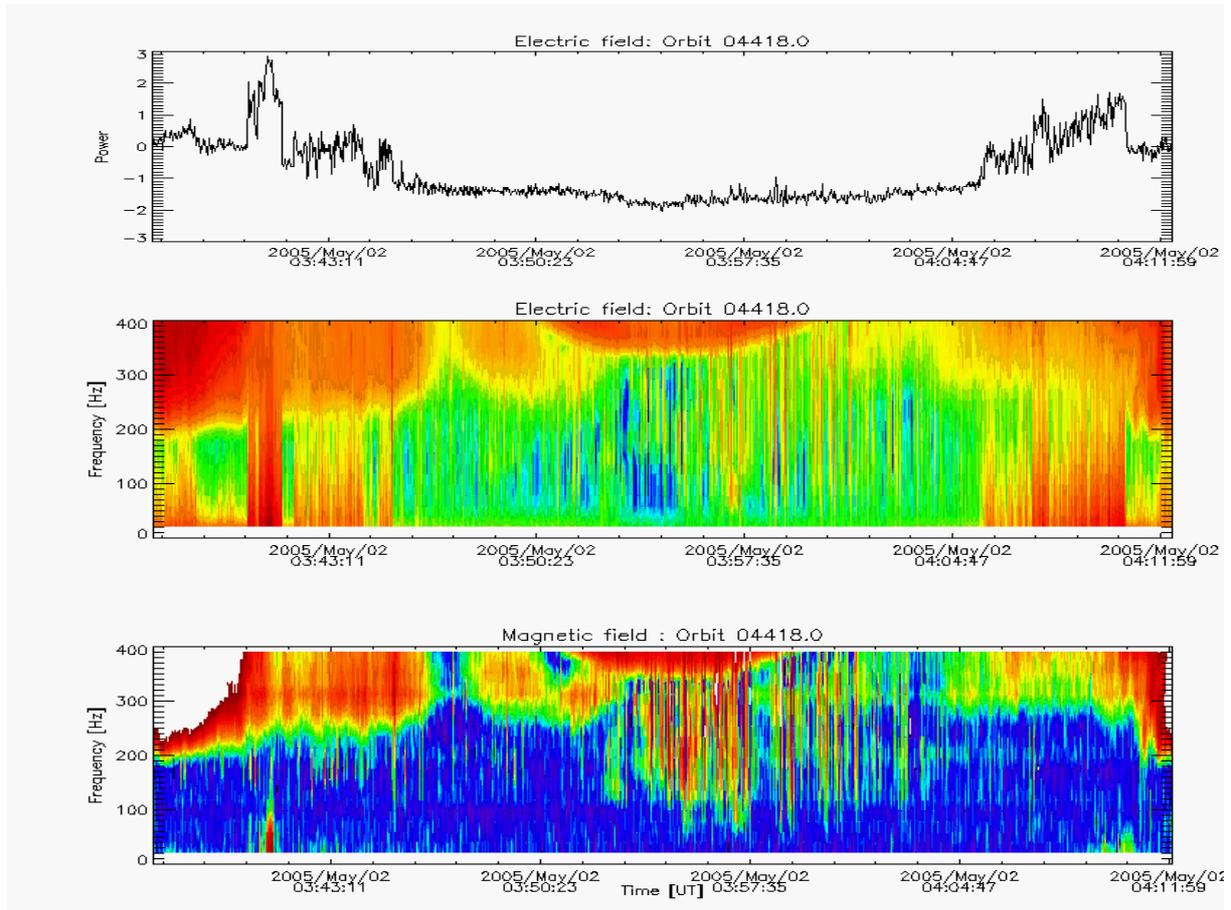


Figure 5 : Spectres de puissance du champ électrique (panneau du milieu) et du champ magnétique obtenu de l'expérience IMSC (panneau inférieur). La puissance du spectre du champ électrique à 20Hz est indiquée dans le panneau supérieur.

Les observations pour toutes les demi-orbités dans la région du Sichuan sont représentées avec la variation des indices am et Dst dans la Figure 6 en fonction du temps et de la latitude géomagnétique. Les saisons indiquées correspondent à celles de l'hémisphère nord. On constate que l'intensité de la turbulence électrostatique augmente avec l'activité magnétique. Cette figure permet aussi de mettre en évidence une variation saisonnière avec des signaux plus intenses en été et en hiver et une périodicité de ~ 27 jours observée très clairement entre Avril et Octobre 2007 vraisemblablement associée à la rotation du Soleil.

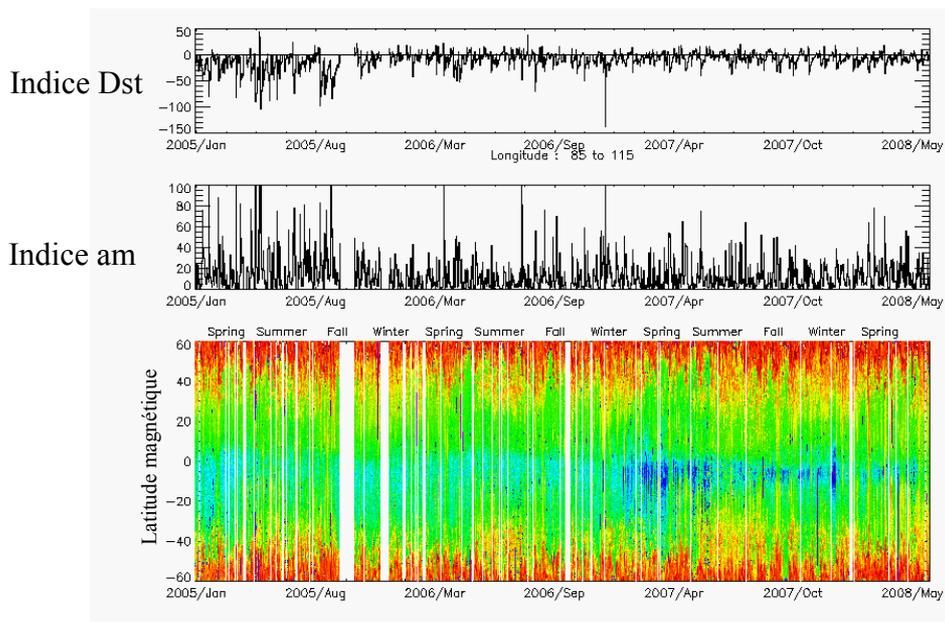


Figure 6 : Puissance à 20Hz de la turbulence électrostatique en fonction du temps et de la latitude géomagnétique dans le secteur du Sichuan et indices ap et Dst correspondants.

Dans la Figure 7 nous avons représenté la variation de la turbulence électrostatique en fonction de l'activité magnétique pour différentes saisons. Dans toutes les cas, l'intensité de la turbulence électrostatique augmente avec am. Bien qu'il n'y ait pas beaucoup de cas de fortes activités magnétiques, il semble que la frontière de la forte intensité descende, dans ces cas, à des latitudes géomagnétiques relativement faibles de 30° à 40°. L'intensité à basse latitude à l'équinoxe de mars (le printemps dans l'hémisphère nord) est plus faible que pour les autres saisons, ce qui est peut-être dû à l'activité faible observée en avril 2007.

Nous avons calculé le pourcentage d'occurrence de la turbulence en relation avec l'activité magnétique pour différents niveaux de l'intensité à 20Hz. Les Figures 7 à 10 montrent ces résultats pour des classes de turbulence supérieure à 0.1, 1, 10 et 100 $\mu\text{V}^2/\text{m}^2/\text{Hz}$ en organisant les données suivant la saison et le niveau d'activité magnétique caractérisé par l'indice am. Sur la Figure 8 on constate que, pour des niveaux de turbulence faibles, et au cours de l'hiver, l'intensité est corrélée à l'activité magnétique. Au printemps et en automne, on observe une augmentation de l'occurrence sur l'ensemble des latitudes concernées. La Figure 9 correspond à une turbulence plus forte que 1 $\mu\text{V}^2/\text{m}^2/\text{Hz}$ qui est observée au-delà de 30° à 40° de latitude quelque soit la saison et le niveau d'activité et qui est probablement liée à la convection sub-aurorale. L'augmentation en fonction de l'activité magnétique est nette aux latitudes supérieures à 40°. Une turbulence avec une intensité supérieure à 10 $\mu\text{V}^2/\text{m}^2/\text{Hz}$ (Figure 10) ne s'observe qu'aux latitudes supérieures à 40° et est fortement corrélée à l'activité magnétique représentée par l'indice am. Finalement, la Figure 11 montre le cas des intensités élevées, supérieures à 100 $\mu\text{V}^2/\text{m}^2/\text{Hz}$, uniquement observées à haute latitude et dont l'occurrence semble plus forte dans l'hémisphère sud.

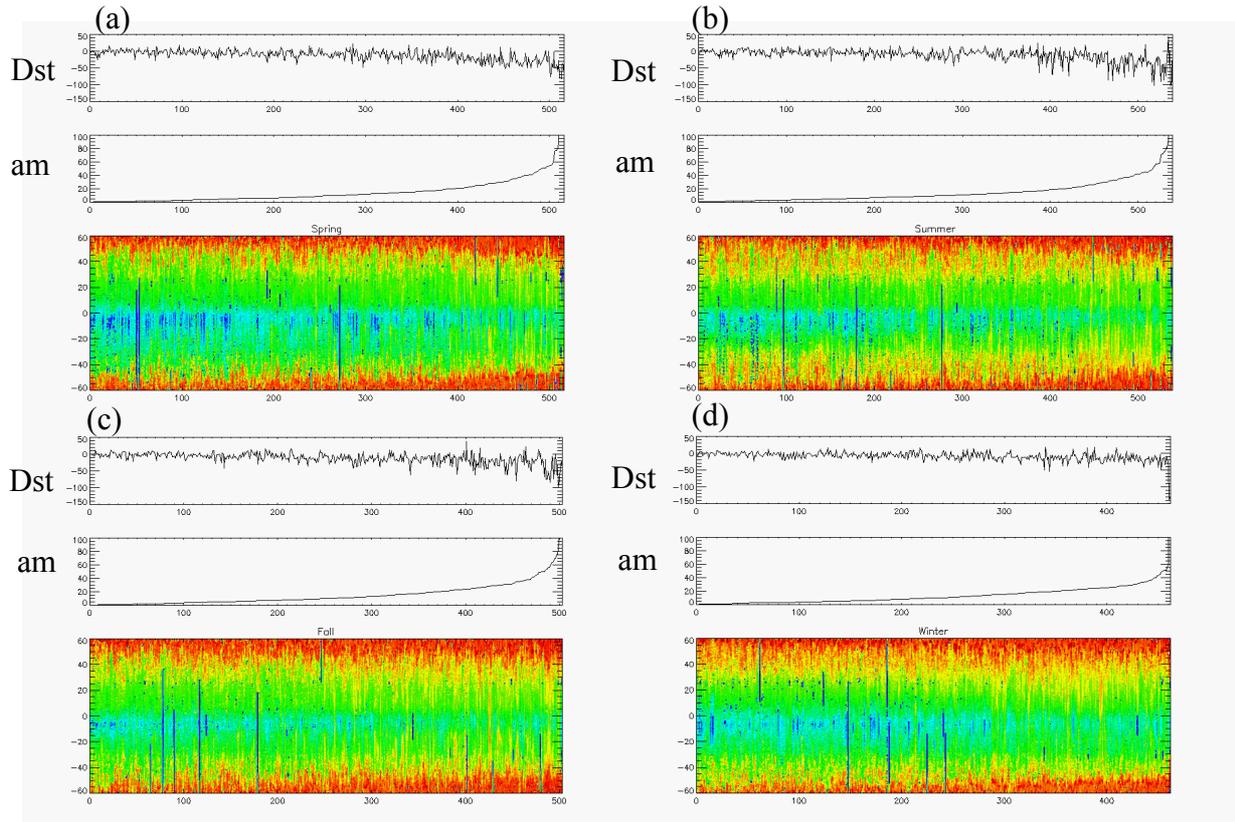


Figure 7 : Puissance de la turbulence électrostatique à 20Hz pour les 4 saisons en fonction de l'indice am.
 Panneaux (a) Equinoxe de mars \pm 45 jours, (b) Solstice de Juin \pm 45 jours,
 (c) Equinoxe de Septembre \pm 45 jours et (d) Solstice de Décembre \pm 45 jours

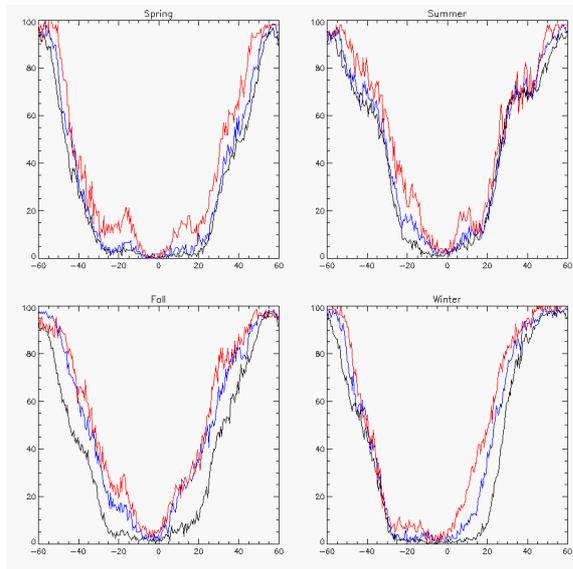


Figure 8 : Pourcentages de l'occurrence de la turbulence supérieure à $0.1 \mu V^2/m^2/Hz$. Indice am :
 < 10 (noir), $10 < am < 20$ (bleu), $20 < am < 30$ (rouge)

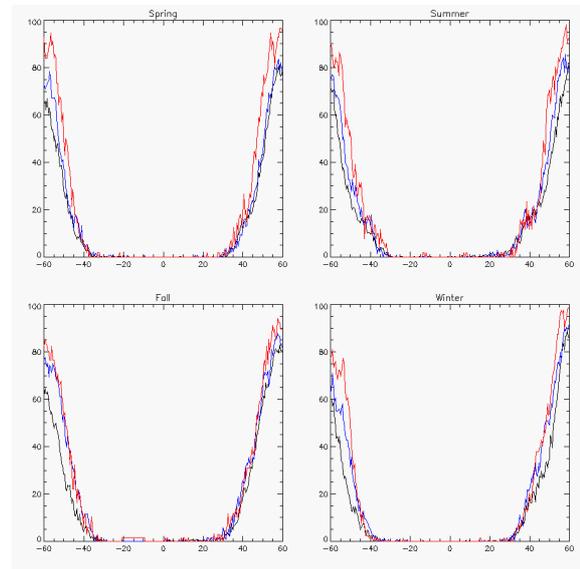


Figure 9 : Intensité supérieure à $1 \mu V^2/m^2/Hz$.

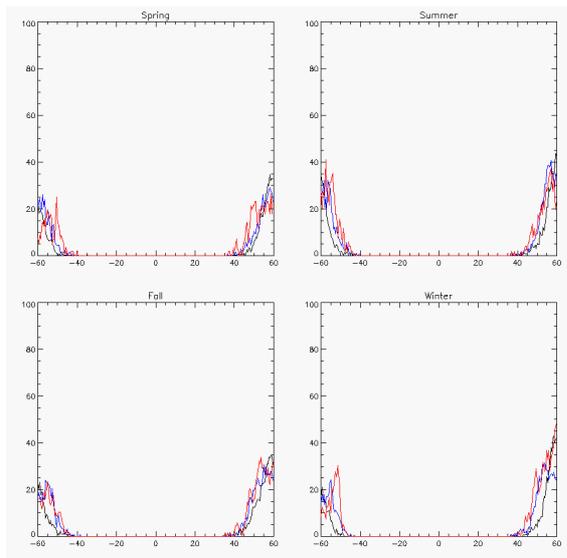


Figure 10 : intensité supérieure à $10 \mu\text{V}^2/\text{m}^2/\text{Hz}$.

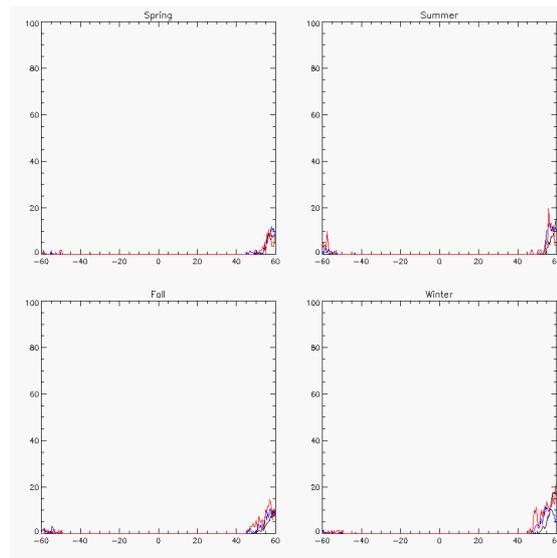


Figure 11 : intensité supérieure à $100 \mu\text{V}^2/\text{m}^2/\text{Hz}$.

3.3. Emetteurs TBF.

La dernière partie de la présentation montre brièvement quelques résultats concernant la détection et la caractérisation des émetteurs TBF de forte puissance, notamment les élargissements en fréquences observés assez fréquemment et comparés à la turbulence électrostatique.

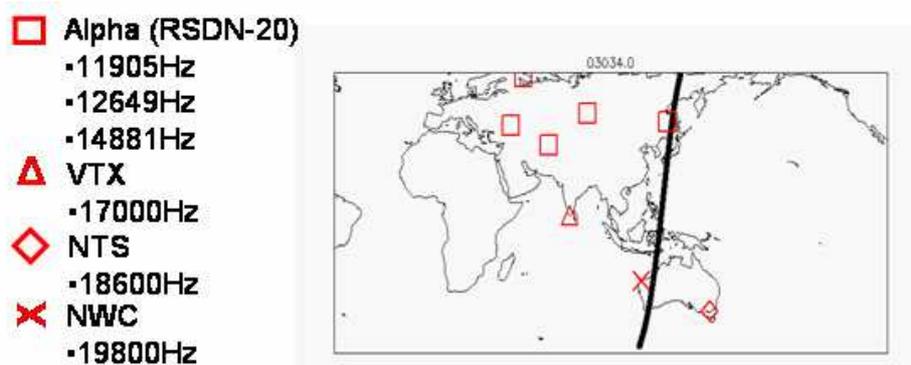


Figure 12 : Positions des émetteurs TBF, dont les signaux sont observés par DEMETER dans le secteur longitudinal du Sichuan

Dans le secteur longitudinal de Sichuan, les signaux forts sont ceux qui viennent des émetteurs de navigation Alpha en Russie et de NWC, Exmouth dans Australie-occidentale (Figure 12). Pour ce travail, nous avons choisi les émissions à 19800Hz de NWC. La puissance au pic et l'élargissement de la fréquence ont été analysés en fonction de l'intensité de la turbulence électrostatique représentée par la puissance à 20Hz. Les résultats initiaux sont indiqués dans les 2 histogrammes de la Figure 13. L'histogramme dans le panneau (a) montre la corrélation entre l'intensité à 20Hz (axe-x) et la largeur à mi-hauteur des signaux de l'émetteur. Cette largeur à mi-hauteur est élargie quand l'intensité à 20Hz est plus forte. Le Panneau (b) montre un autre histogramme comparant l'intensité à 20Hz et la puissance maximum des signaux de l'émetteur. On constate aussi une augmentation de la puissance des signaux reçus lorsque l'intensité à 20Hz plus élevée. Ces observations préliminaires sont actuellement analysées pour comprendre les mécanismes de diffusion des ondes de l'émetteur par les irrégularités du plasma.

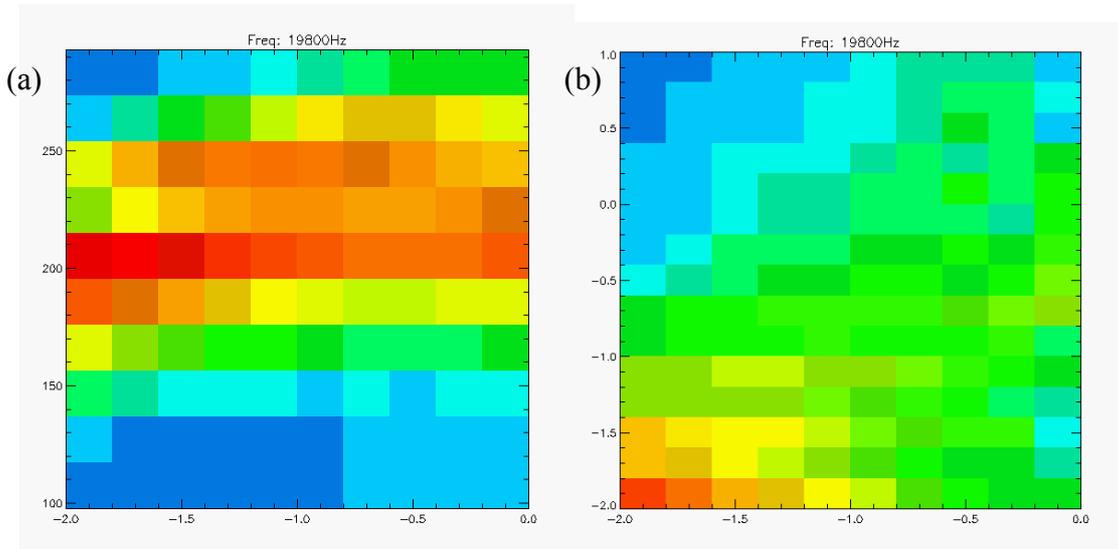


Figure 13 : Histogrammes montrant les corrélations entre
 (a) l'intensité à 20Hz et la gamme de fréquence des signaux de l'émetteur TBF
 (b) l'intensité à 20Hz et la puissance maximum de l'émetteur.

3.4. Etude statistique du cas du séisme de Sichuan du 12 mai 2008

L'intensité à 20Hz caractéristique de la turbulence électrostatique a été utilisée dans une étude statistique sur le cas du séisme du Sichuan. Pour diminuer les biais liés à la variabilité saisonnière et à l'activité magnétique, nous avons choisi les demi-orbitales dans le secteur longitudinal du Sichuan, correspondant à des valeurs de l'indice am plus faibles que 10 pendant les période de ± 20 jours centrées sur le 12 mai de chacune des années étudiées. Sur la Figure 14 on peut remarquer que le niveau de l'intensité en 2008 est un peu plus élevée que les autres années, et semble aussi augmenter au voisinage de l'épicentre, cette anomalie semblant commencer 4~5 jours avant le séisme et continuer pendant 7~10 jours après. Ce résultat est très préliminaire et nous ne voulons pas, actuellement, tirer de conclusion concernant l'existence de signaux pré-sismiques avant une étude critique plus approfondie pour prendre convenablement en compte les effets potentiels de l'activité magnétique.

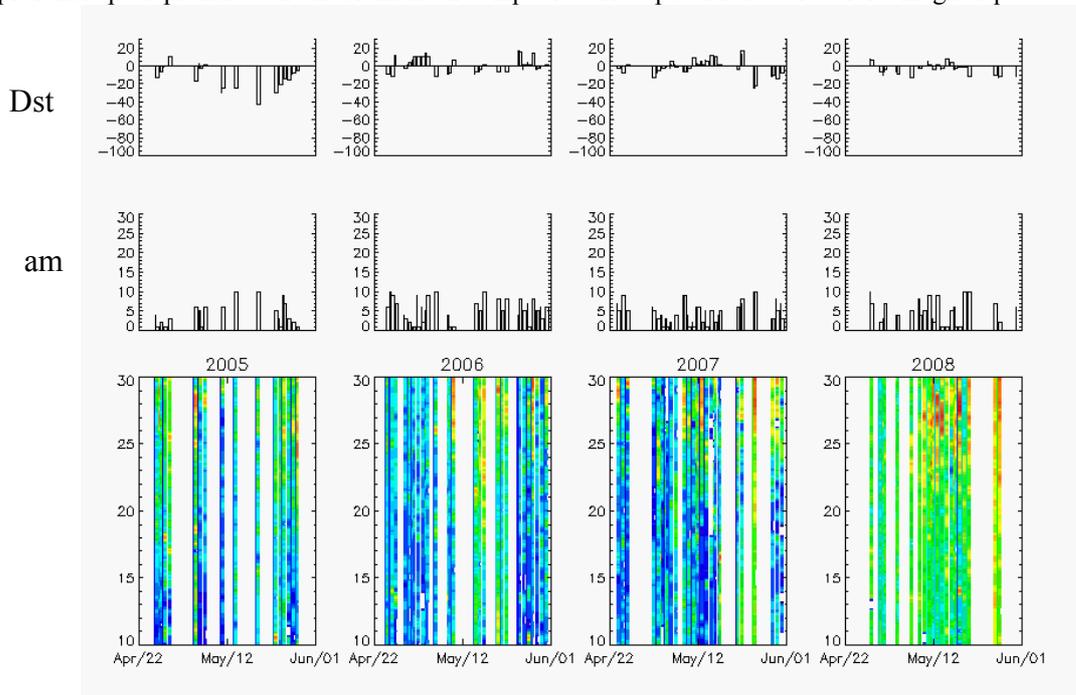


Figure 14 : Intensité à 20Hz de la turbulence électrostatique dans la région du Sichuan entre le 22 avril et le 1 Juin des années 2005 à 2008. Le séisme de Sichuan s'est produit le 12 mai 2008. Toutes les données correspondent à l'indice $am \leq 10$.

4. Conclusion.

Les données du spectre du champ électrique fournies par ICE à bord DEMETER ont été utilisées pour une étude statistique sur des phénomènes électrostatiques. Une méthode automatique de détection et de reconnaissance des émissions trouvées dans la gamme de fréquence TBF a été développée et utilisée pour détecter et caractériser la turbulence électrostatique et les signaux des émetteurs TBF. La turbulence électrostatique est caractérisée par l'intensité du champ électrique à 20Hz à condition que la pente du spectre soit négative du spectre et que la puissance du champ magnétique soit faible. L'occurrence des turbulences fortes a été étudiée en fonction des saisons et l'indice am dans un secteur longitudinal de 30 degrés. Les résultats montrent l'évolution de la frontière de la turbulence en latitude ainsi que la variation de son intensité en fonction de l'activité magnétique.

L'intensité de la turbulence électrostatique a été aussi comparée avec les signaux des émetteurs TBF. L'élargissement en fréquence des signaux des émetteurs montre une bonne corrélation avec l'intensité de la turbulence électrostatique, confirmant les modèles d'interaction des émetteurs avec les irrégularités du plasma.

Enfin, une étude initiale sur le cas du séisme du Sichuan du 12 mai 2008 en se limitant aux jours de faible activité magnétique semble indiquer une augmentation du niveau de turbulence au voisinage de l'épicentre environ 5 jours avant le séisme qui subsiste au cours d'une période d'une dizaine de jours après le séisme. Cependant une analyse plus détaillée en cours actuellement doit être menée à bien avant de tirer une conclusion définitive.