

Étude des perturbations séismo-ionosphériques et séismo-électromagnétiques enregistrées par DEMETER

¹R. MEBARKI, ²N. ZAOURAR, ²M. HAMOUDI & ³M. PARROT

1. Institut National de Cartographie et de Télédétection - INCT, Algérie

Email: inct99@wissal.dz ; mebarki_imen@yahoo.fr

2. Laboratoire de Géophysique, FSTGAT, USTHB, Algérie

3. LPCE2 (Laboratoire de physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace), Orléans- France

ملخص : إن مراقبة الأقمار الصناعية لطبقات الغلاف الجوي للأرض تسمح بدراسة الإشارات اليونوسفيرية المرتبطة بالظواهر الأرضية كالزلازل، البراكين و أمواج التسونامي العالية. هذا المقال يعرض دراسة التغيرات المسجلة على مستوى اليونوسفيرية بواسطة القمر الصناعي الصغير الحجم « ديميتير ». ديميتير يقيس على مستوى ارتفاعه: الحقل الكهربائي و الحقل المغناطيسي على مدى ترددات مختلفة كما يقيس أيضا تغيرات العناصر المكونة للبلازما. الهدف الأساسي لديميتير هو دراسة الاضطرابات اليونوسفيرية الناتجة عن النشاط الزلزالي. تحويلة الموجات المستمرة هي الطريقة المستعملة لدراسة الإشارات المتشكلة في اليونوسفير على إثر وقوع زلزال أولي منذر بحدوث نشاط آخر أكثر أهمية. دراسة معطيات زلزال اليابان تبين أن قيم الدليل الطيفي المحصل عليها تاهل هذا المؤشر لكشف النشاط الزلزالي قبل حدوثه.

الكلمات الأساسية : الإشارات اليونوسفيرية، الظواهر الطبيعية، ديميتير، تحويلة الموجات المستمرة، زلزال أولي.

Résumé : L'observation satellitaire des enveloppes fluides de la planète Terre permet l'étude des signatures ionosphériques relatives aux phénomènes telluriques, tels que : les séismes, les tsunamis ou les volcans. Dans ce travail, nous nous intéresserons à l'étude des variations ionosphériques enregistrées par le microsatellite DEMETER. Ce dernier, mesure dans l'ionosphère le champ électrique et le champ magnétique dans diverses bandes fréquentielles, ainsi que les paramètres caractérisant le plasma à l'altitude du satellite. L'objectif principal de DEMETER est d'étudier les perturbations ionosphériques en liaison avec l'activité séismique. La Transformée en ondelettes Continue (TOC) est la méthode sélectionnée pour le traitement de la fractalité des signaux engendrés par les précurseurs au niveau de l'ionosphère. Cet article étudie les données enregistrées par DEMETER au dessus du Japon (zone de subduction). Les résultats obtenus montrent que tous les signaux séismo-ionosphériques et séismo-électromagnétiques pré-séismiques se comportent comme des mouvements browniens fractionnaires persistants ($2 < \beta \leq 3$) ou anti-persistants ($1 \leq \beta < 2$) ayant une mémoire statistique, ce qui offre la possibilité de proposer l'exposant spectral comme un indice de prédiction de l'activité séismique.

Mots clés : signatures ionosphériques, phénomènes telluriques, DEMETER, TOC, précurseurs, mouvements browniens fractionnaires.

Abstract : The ionospheric signatures related to the telluric phenomena, such as earthquakes, tsunamis or volcanic activities express a particular coupling between the solid Earth and its various surrounding fluid envelopes. Such phenomena are of great importance, because they occur between a few hours and a few days before the main shock, and then, they can be considered as short term precursors. DEMETER is the first satellite devoted and optimized to study the correlation between seismo-electromagnetic phenomena and ionospheric-magnetospheric perturbations detection. The Continuous wavelet Transform (CWT) is the method used to analyze the fractality of signals caused by le precursors at the level of the ionosphere. This article studies the Japan earthquake data record by DEMETER (subduction zone). This analysis allowed us to obtain a roughness values included between $2 < \beta \leq 3$ and $1 \leq \beta < 2$, what classifies the seismo-ionospheric signals and the seismo-electromagnetic ones as Fractional Brownian Motions persisting or anti-persisting having a statistical memory. This property of the correlation with long reach, offer us the possibility of using the spectral exponent $\beta(t)$ as a prediction indication of a seismic activity.

Keywords : ionospheric signatures, telluric phenomena, DEMETER, CWT, precursors, Fractional Brownian Motions.

1. Introduction

La Terre est souvent secouée par des tremblements de terre violents aux conséquences humaines et matérielles dramatiques. La prévision temporelle de ces phénomènes reste encore incertaine.

La Sismologie moderne peut donc franchir la limite théorique et observationnelle de la surface de la Terre pour conquérir l'ensemble de la planète et les interactions entre ses différentes parties solides et fluides [Pulinets et al., 1994, Lognonne et al., 2006 ; Lagoutte et al., 2005 ; Occhipinti, 2006 ; Parrot, 2006 & Li, 2007].

Ce changement de paradigme rend plus vaste le champ d'action de la sismologie et ouvre une nouvelle série d'observations pour la détection des phénomènes telluriques par le biais de l'observation satellitaire des enveloppes fluides de la Terre.

DEMETER (*Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquakes Regions*), est un microsatellite développé par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES / France), il avait pour objectif la détermination

de l'origine des signaux enregistrés dans l'ionosphère ainsi que l'ensemble de leurs caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles.

Ceci, afin de permettre la détermination des conditions d'apparition de ces signaux à haute altitude ainsi que leur variabilité en fonction des caractéristiques géophysiques de l'événement source d'une part, et des conditions atmosphériques, ionosphériques et magnétosphériques d'autre part.

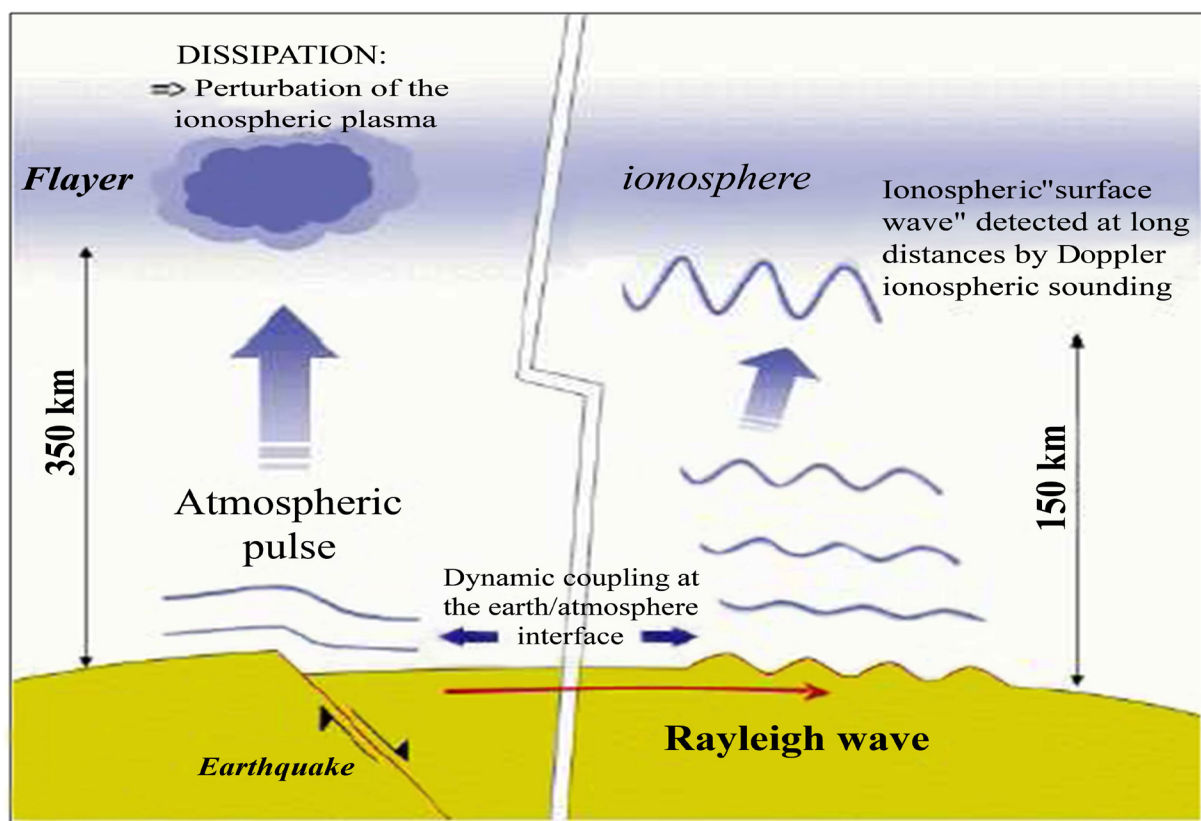


Fig. 1 Couplage dynamique Post-séismique entre la Terre solide et l'atmosphère. [Occhipinti et al., 2004]

2. Perturbations ionosphériques liées à une activité séismique

Dans un passé proche, la sismologie s'appuyait, essentiellement, sur l'étude des phases co et post séismique. Ces dernières années et avec le développement des outils d'acquisition et d'analyse, l'étude de la phase pré-séismique a donné de nouveau l'espoir aux sismologues, afin qu'ils puissent établir des méthodes de prévisions. Plusieurs chercheurs [Pulinets et al., 1994, Occhipinti, 2006 ; Parrot, 2006] ont commencé à exploiter certains enregistrements tels que : les émissions EM de type VLF, ULF et ELF [Pulinets, 1994, Liu et al., 2000] et l'effet de l'onde de Rayleigh sur le plasma ionosphérique, mis en évidence depuis les années soixante grâce aux observations par sondeur Doppler ensuite par GPS via la mesure du contenu électronique total (TEC),

afin de trouver une éventuelle corrélation entre les perturbations ionosphériques et les phénomènes telluriques.

Certains d'entre eux ont réussi à mettre en évidence plusieurs types d'ondes atmosphériques générées par l'onde séismique de Rayleigh [Pulinets, 1998, Lognonne et al., 2006 ; Lagoutte et al., 2005 ; Occhipinti, 2006 ; Parrot, 2006 & Li, 2007]. Ils ont alors déduit que le principe d'un tremblement de terre est beaucoup plus compliqué que celui d'un phénomène isolé. Quand ce dernier se déclenche, il fait vibrer le sol (ou l'eau - cas des séismes marin ou off-shore) qui, à son tour, fait vibrer l'air et engendre des ondes acoustiques (ou des ondes de gravité ou gravito-acoustiques) qui se propagent et s'amplifient en se déplaçant vers le haut jusqu'à atteindre l'ionosphère (Fig.1).

3. L'approche fractale des mesures séismo-ionosphériques

Les signaux ionosphériques relatifs aux phénomènes telluriques ont une nature non stationnaire et imprévisible.

L'analyse approfondie de ces signaux transitoires requiert un outil de traitement capable d'exploiter toute l'information véhiculée par leurs singularités. La transformée en ondelettes continue (TOC) est donc un microscope mathématique [Torresani, 1995], elle est définie par :

$$C_f(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \overline{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (1)$$

Où $f(t)$ est le signal, $\overline{\psi}$ le conjugué de l'ondelette mère, a et b correspondent respectivement au facteur d'échelle et à la translation.

Les ondelettes agissent comme un microscope mathématique, adaptant sa résolution à la taille de l'objet analysé. Les ondelettes les plus employées pour l'étude de la fractalité des signaux ionosphériques sont les gaussiennes et leurs dérivées. Pour notre étude, nous avons choisi une gaussienne déplacée en fréquence appelée ondelette de Morlet :

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2) \cdot \exp(i\omega t) \quad (2)$$

L'approche fractale par TOC met donc l'accent sur la mesure de la régularité locale traduite par le paramètre de Hurst H ou par l'exposant spectral β [Lévy, 1965 et Meyer et al., 1987] qui reflètent la rugosité du signal et qui sont liés par la relation suivante :

$$\beta = 2H + 1 \quad (3)$$

4. Analyse en ondelettes d'un événement pré-séismique

Les données acquises par DEMETER depuis le début de la mission sont d'une grande qualité et des événements importants ont déjà été enregistrés (http://smc.cnes.fr/DEMETER/Fr/A_publications.htm). Plusieurs niveaux

d'accès aux données sont disponibles. Nous avons utilisé dans ce travail les données relatives au niveau 1 correspondant aux données physiques calibrées [Lagoutte et al., 2006]. Une information auxiliaire est également ajoutée à ces fichiers afin de les rendre prêts pour les plus hauts niveaux de traitements. Les fichiers de données sont alors classés selon l'identifiant et selon le numéro de la demi-orbite correspondante.

DEMETER fonctionne selon deux modes d'acquisition principaux [Lagoutte et al., 2005 & 2006]:

- **Mode «Survey»**, noté aussi Surveillance ou aperçu.
- **Mode «Burst»** aussi dit mode Événement ou mode continu.

Parmi les zones séismiques survolées par ce satellite, seules les zones continentales seront couvertes en mode *burst* car il est peu probable de mesurer des phénomènes électromagnétiques dont l'origine provient du fond des océans en raison de la très forte atténuation des ondes électromagnétiques dans l'eau. Les dorsales seront donc couvertes en mode *survey*, un mode qui pourra évoluer dans le cas de la survenue des événements intéressants [Lagoutte et al., 2005 & 2006].

Grâce à la base de données DEMETER, nous avons réussi à accéder à plusieurs séries temporelles de données physico-chimiques du plasma ionosphérique local (IAP / ISL) et de données séismo-électromagnétiques enregistrées au dessus du Japon.

4.1 Séisme de Honshu

La séismicité de la côte Sud de Honshu est due essentiellement à la subduction de la plaque océanique des Philippines au dessous de la plaque Eurasiatique avec une vitesse de 4 cm/an. L'une des conséquences de ce choc, est le séisme du 05 septembre 2004 enregistré à 10:07:07 (TU) et causé principalement par une faille inverse. Les stations séismologiques au sol ont enregistré une magnitude de 7.2 sur l'échelle de Richter et le foyer a été localisé à 14 Km de profondeur, dans la croûte près de la côte Sud Ouest de Honshu à 33°.06 N de latitude et 136°.64 E de longitude.

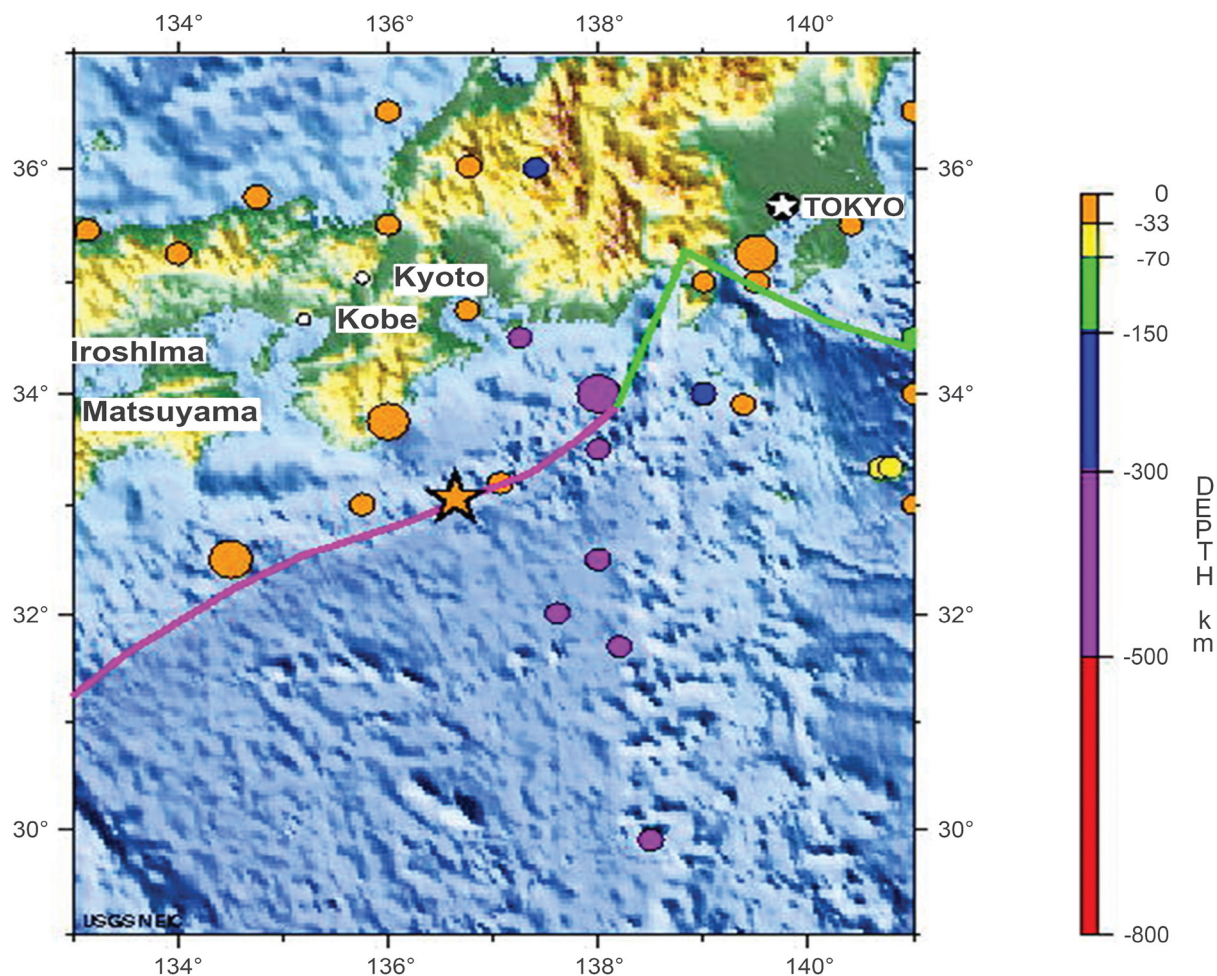


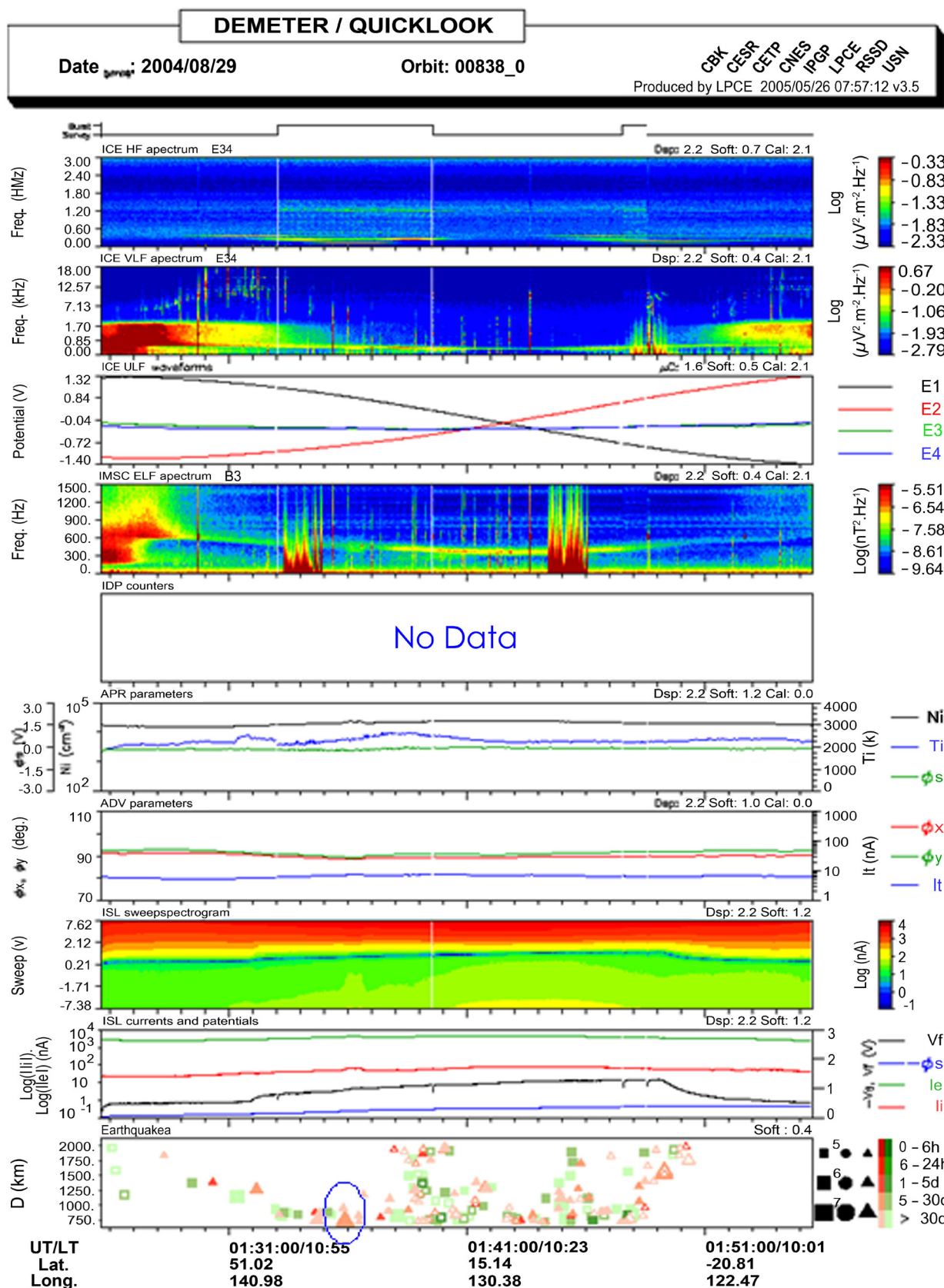
Fig. 2 Localisation de l'épicentre séismique (étoile en orange). [Source : <http://neic.usgs.gov>]

Les données relatives à la demi-orbite N° 838, enregistrée le 29 Août 2004 à 01h:26min:00sec par DEMETER, sont analysées pour expliquer les conditions qui régnaient au niveau de l'ionosphère une semaine avant le séisme principal de Honshu.

Pour la mise en évidence des précurseurs de ce séisme principal, nous avons analysé les données recueillies par DEMETER issues des outils suivants: ICE (*Instrument Champ Electrique*), IMSC (*Instrument Magnetic Search Coil*- mesure du champ magnétique en spirales), IAP (*Instrument Analyseur de Plasma*) et ISL (*Intrument Sonde*

langmuir) qui permettent d'étudier l'état de l'ionosphère au dessus de certaines régions séismiques.

Les mesures effectuées par le réseau sismologique japonais au sol [SEISMIC EVENT- serveur DEMETER] sont aussi exploitées à travers l'image Quick look (fig 3) de la demi orbite descendante N°838. Ces données sont utilisées uniquement pour corréler les événements séismiques point par point avec les perturbations enregistrées par DEMETER et avec les singularités mises en évidence par l'exposant spectral $\beta(t)$.



4.2 Traitement des données satellitaires

Les effets séismo-électromagnétiques sont des perturbations électriques et magnétiques causées par les phénomènes telluriques [Pulinets et al., 1994, Liu et al., 1998]. Ils comprennent : les émissions électromagnétiques dans une large bande de fréquences, les perturbations ionosphériques, les anomalies de propagation des signaux TBF (Très Basses Fréquences), etc.

L'activité séismique peut également, générer des variations dans la population du plasma à cause des changements de la composition des ions et des neutrons suite aux réactions chimiques et à l'excitation moléculaire [Occhipinti, 2006, Mourad, 2007]. Ces variations séismo-ionosphériques résultent de la redistribution de la concentration des électrons en fonction de l'altitude.

4.2.1 Analyse spectrale par transformée de Fourier

Nous avons effectué une analyse spectrale, par Transformée de Fourier (TF), de plusieurs séries temporelles enregistrées par DEMETER dans le but de déterminer la nature complexe et le modèle mathématique qui caractérise l'évolution de ces signaux.

Les données exploitées sont caractérisées par les paramètres suivants :

- les signaux électriques et magnétiques Très Basses Fréquences (*TBF ou VLF en anglais*), le pas d'échantillonnage est $\Delta t = 0.00015$ seconde pour une longueur du signal $N = 32768$ échantillons ,
- les signaux IAP dont le pas d'échantillonnage $\Delta t = 4.506$ seconde et la taille du signal $N_{IAP} = 329$ IAPN échantillons ,
- les signaux ISL ont une taille de $N_{ISL} = 1486$ échantillons avec un pas d'une valeur/seconde.

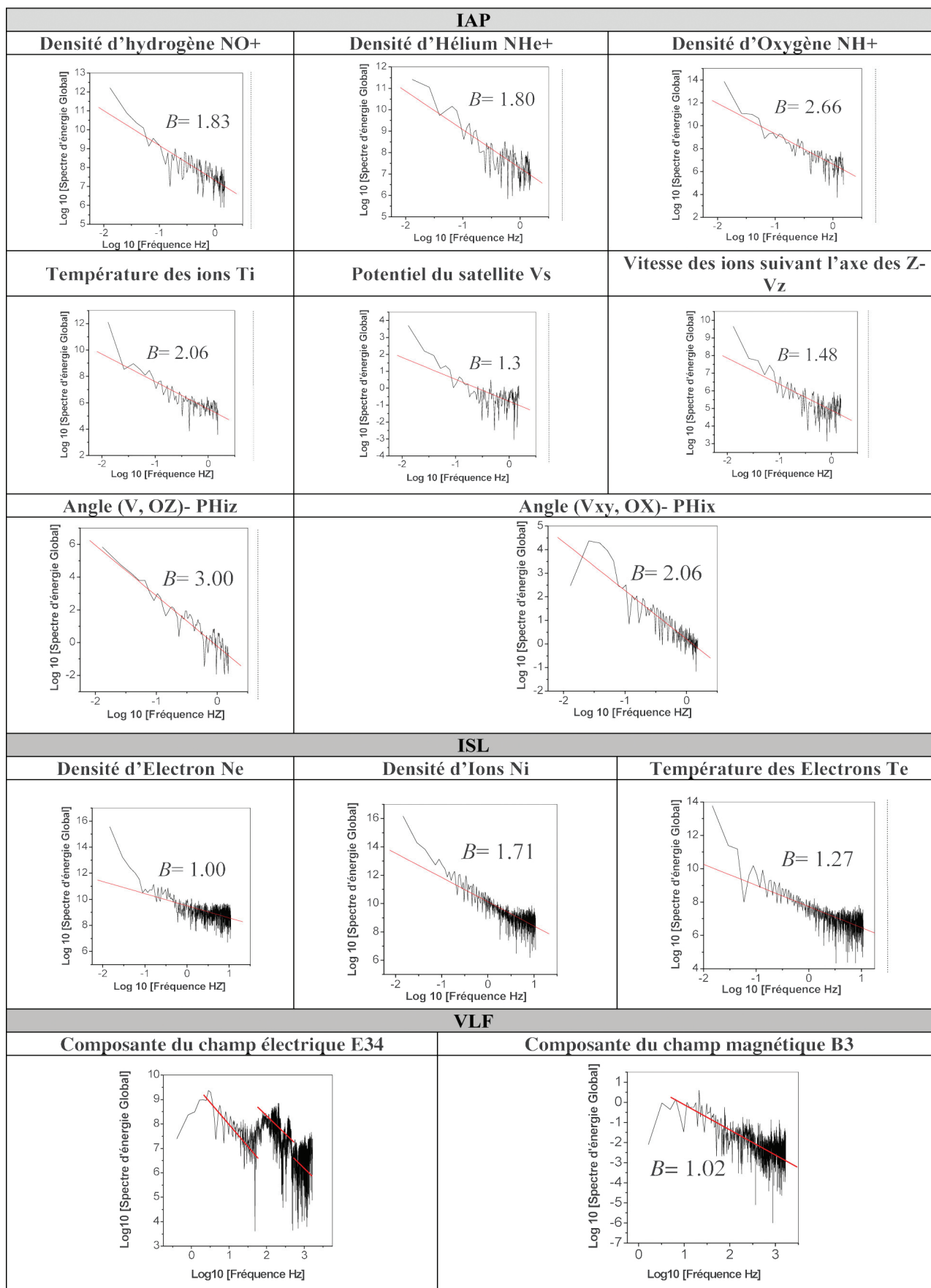


Fig. 4 Spectres de Fourier des signaux analysés

Nous remarquons que le comportement spectral varie d'un signal à un autre, ce qui implique que les enregistrements séismo-électromagnétiques et séismo-ionosphériques enregistrés par DEMETER sont de nature complexe. Nous constatons sur les graphes du champ électrique et magnétique, qu'il y'a des interférences et des alternances entre deux régimes différents.

On peut constater à partir des spectres illustrés par la figure 4 que les signaux : B3, IAP et ISL montrent une décroissance très nette de l'énergie vers les hautes fréquences. L'analyse spectrale révèle donc que ces enregistrements se comportent comme des mouvements browniens fractionnaires (mBf) qui obéissent à une loi en décroissance algébrique $F(f) \approx f^{-(2H+1)}$ ou f est la fréquence. À une dimension, le mBf est considéré comme un très bon modèle pour caractériser les phénomènes physiques qui possèdent des corrélations sur de longues périodes [Mandelbrot, 1983, Herman, 1997, Hölsneider, 1989, Lévy, 1965].

Pour le spectre E34, on remarque qu'il est de nature très complexe. L'avantage de l'analyse spectrale est de permettre, à travers les spectres d'énergie, de déterminer les différents domaines fréquentiels de séparation de chaque processus. Ce qui nous facilite le choix de la méthode d'analyse appropriée à chaque intervalle.

4.2.2 Analyse multi-échelles

Les singularités non stationnaires de l'ensemble des données précédentes gagneraient beaucoup à être

étudiées par le biais d'une méthode multi-échelles et non stationnaire, qui offre la possibilité de représenter les signaux dans le plan temps fréquence afin de permettre une double localisation.

a. Analyse des signaux séismo-électromagnétiques

Les phénomènes électromagnétiques enregistrés sur la bande fréquentielle VLF varient très rapidement en fonction du temps et en fonction de la vitesse de déplacement de DEMETER (période de 100 Min). L'analyse en ondelettes sera donc appliquée sur une série emporelle d'environ une minute correspondant à l'intervalle [01h:35min : 22s:412ms---01h:36min:16s:315ms] sur l'image QL. Ce choix va nous permettre d'étudier l'activité électromagnétique au dessus du Japon uniquement.

Afin de mieux localiser les phénomènes séismiques et apprécier les différents changements rapides au voisinage du précurseur, l'intervalle temporel initial s'étalant sur [0- 60 s] sera étudié en deux phases :

- Etude avant et pendant le déroulement du précurseur correspondant à l'intervalle temporel [31.5 s, 31.8 s]. La taille du signal de la partie pré-séismique est égale à 2048 valeurs échantillonnées avec un pas de. La bande fréquentielle exploitée par la TOC est $f \in [10^{-3} \text{ Hz}, 3.33 \text{ KHz}]$
- Etude après le précurseur correspondant à l'intervalle temporel [36.8 s, 38.03 s] qui enregistre 8192 échantillons.

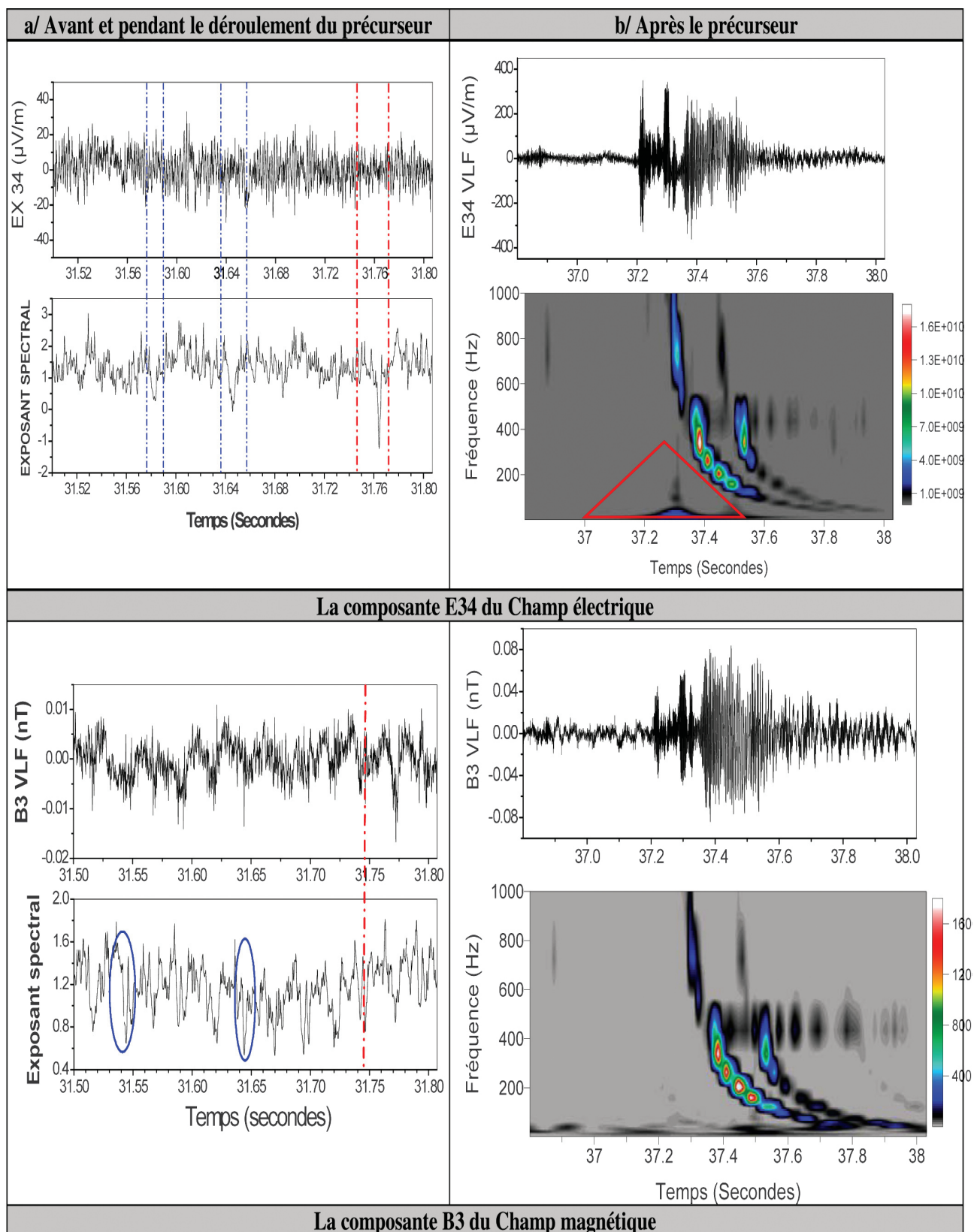


Fig. 5 Analyse par TOC des signaux électromagnétiques VLF générés par le précurseur
A droite : l'analyse pré et co-séismique. *A gauche* : l'analyse post-séismique

La phase avant le précurseur de la figure 5 montre un comportement quasi similaire des deux champs E34 et B3. La morphologie des deux signaux est en accord avec le concept spectral calculé précédemment par la Transformée de Fourier (Fig.4). On peut donc calculer l'évolution temporelle pour l'estimation d'un exposant spectral. Les valeurs moyennes de ce facteur sont égales à (1.33 ± 0.47) pour le signal E34 et à (1.17 ± 0.23) pour le signal B3 ce qui classe ces signaux comme des mouvements browniens fractionnaires anti-persistants. Cet exposant révèle la présence de fortes activités séismiques avant (zones limitées en bleu) et pendant le déclenchement du séisme. Les perturbations pré-séismiques du signal E34 sont donc localisées à la 31^{ème} seconde 585 millisecondes et la 31^{ème} seconde 650 millisecondes correspondant respectivement en temps universel à: $t=01h:35min:53s:997ms$ et à $t=01h:35min:54s:062ms$, ce qui donne des avances de 156ms et 91ms avant le précurseur de Honshu enregistré à $01h:35min:54s:153ms$.

Les perturbations détectées sur le signal B3 sont localisées à 31^{ème} seconde 544 millisecondes et à la 31^{ème} seconde 644 millisecondes correspondant respectivement aux fortes activités séismiques (Fig.3) localisées à :

- $t=01h:35min:54s:153ms$,
- $t=01h:35min:53s:956ms$,
- $t=01h:35min:54s:056ms$.

Sur les résultats de la phase post-séismique du précurseur de Honshu relative aux signaux E34 et B3, on voit très clairement apparaître dans le demi plan temps-fréquence des scalogrammes, un certains nombres de courbes très énergétiques. Cette forme correspond à un *sweep* dont on peut distinguer la fréquence fondamentale qui est représentée par la courbe la plus énergétique alors que les courbes adjacentes correspondent aux fréquences harmoniques. On peut donc effectuer une double localisation de la fréquence fondamentale des deux champs :

- En temps pour $t \in [37.3 \text{ sec} - 37.8 \text{ sec}]$ secondes correspondant à l'intervalle $[01h:35min:59s:712ms - 01h:36min:00s:212ms]$ par rapport au temps d'enregistrement de DEMETER relatif à la demi-orbite N°838 ;
- En fréquence pour $f \in [0.6 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz}]$ ce qui permettra d'isoler la fréquence harmonique.

On constate également que le champ électrique (E34-phase b) se comporte comme un brownien fractionnaire pour les très basses fréquences comprises entre : 0.6Hz et 100Hz, ce qui justifie l'apparition de la perturbation à l'instant 37.3 secondes (équivalent à $t(TU)=01h:35min:59s:712ms$), correspondant ainsi à une forte activité séismique 5 secondes après le déclenchement du précurseur.

Notons que les courbes d'énergie convergent, en hautes fréquences (1kHz), vers les moments de perturbations séismiques indiquant ainsi une très forte activité enregistrée dans l'ionosphère 5 secondes après le déclenchement de l'événement tellurique.

Les hypothèses sur les mécanismes de génération de ces perturbations séismo-électromagnétiques peuvent dériver de différentes origines telles que : la génération d'onde EM au niveau du sol et/ou à la piézoélectricité [Pulinets et al, 1994, Bernard, 2003 & Mourad, 2007]. Ces phénomènes peuvent donc produire un changement dans le courant de couplage atmosphère-ionosphère. Les ondes électromagnétiques (EM) ainsi générées se propagent à travers les diverses couches atmosphériques (atmosphère neutre et l'ionosphère) ce qui perturbe la réponse réelle du sol par des mécanismes de diffusion (ou interaction) élastique. Cette interaction se produit entre les particules du plasma excitées par la propagation de l'onde gravito-acoustique. Ces régimes diffusifs dépendent étroitement de la bande fréquentielle d'émission des ondes EM par les roches. Ils sont aussi contrôlés par la température, la pression et les mécanismes réactionnels collisionnels des couches atmosphériques traversées. Le transport des ondes EM jusqu'aux couches ionosphériques est dû à la turbulence atmosphérique et au vent thermosphérique [Li. 2007, Mourad. 2007]. Ces régimes diffusifs déclenchent des champs électriques anormaux, des instabilités de plasma générant ainsi des ondes à diverses fréquences. Une autre source des perturbations observées avant les précurseurs peut être causée par les ondes acoustiques de gravité qui peuvent résulter des effets secondaires comme les émissions de gaz à partir du sol. Cet effet peut être important parce qu'en altitude, l'amplitude de ces ondes augmente avec la diminution de la densité atmosphérique.

b. Analyse des signaux séismo-ionosphériques

Les mesures effectuées par l'Instrument Analyseur de Plasma (IAP), nous permettent d'accéder à une importante série temporelle de perturbations représentant les fluctuations de température, de densité (des ions majoritaires H^+ , He^+ , O^+) et de la vitesse des ions du plasma local ainsi que la direction de son flux.

De son côté, l'Instrument Sonde Langmuir (ISL) mesure la densité totale du plasma, la température électronique et le potentiel du satellite.

La figure ci-dessous montre que l'évolution des exposants spectraux calculés par TOC, traduisent fidèlement la moindre activité séismique reflétée par les signaux IAP et ISL. La puissance de ces exposants, nous a permis de mettre en valeur les différents événements séismiques enregistrés au cours de la trajectoire N°838 de DEMETER.

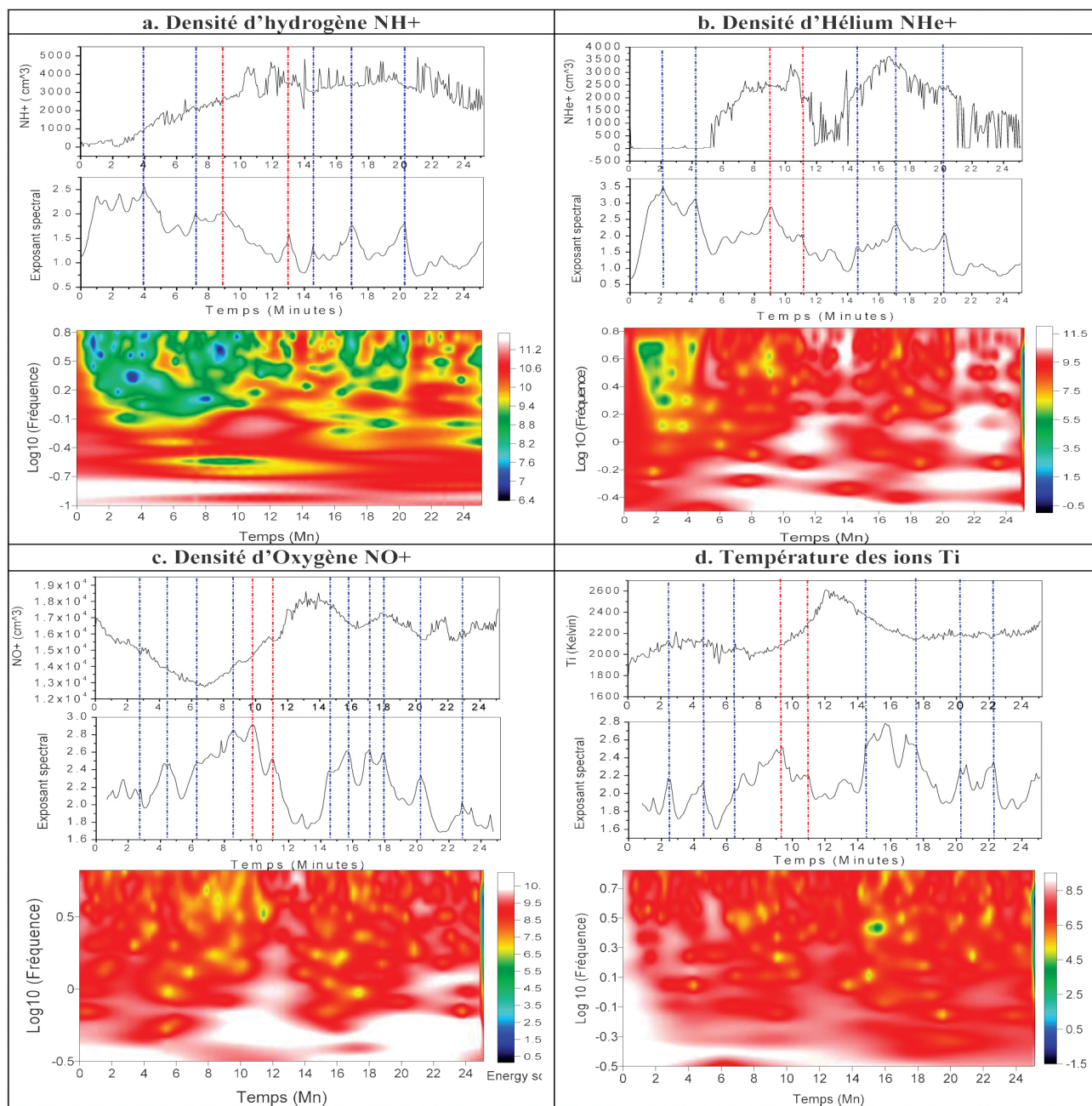


Fig. 6 Ensemble des résultats correspondants aux signaux IAP et l'évolution temporelle de leurs exposants spectraux obtenue par TOC (pour chaque figure, en haut : le signal et en bas : son exposant spectral $\beta(t)$ et la distribution de l'énergie)

L'ensemble des signaux IAP, considérés comme des mouvements browniens fractionnaires, ont mis en évidence, grâce au traitement par ondelettes, toutes les activités sismiques enregistrées le long de la demi-orbite N° 838-0 de DEMETER. L'analyse par TOC, nous a permis d'obtenir des valeurs de rugosité comprises entre $2 < \beta \leq 3$ ou entre $1 \leq \beta < 2$ (Tab.1) associées à de fortes concentrations énergétiques (les nuages blancs

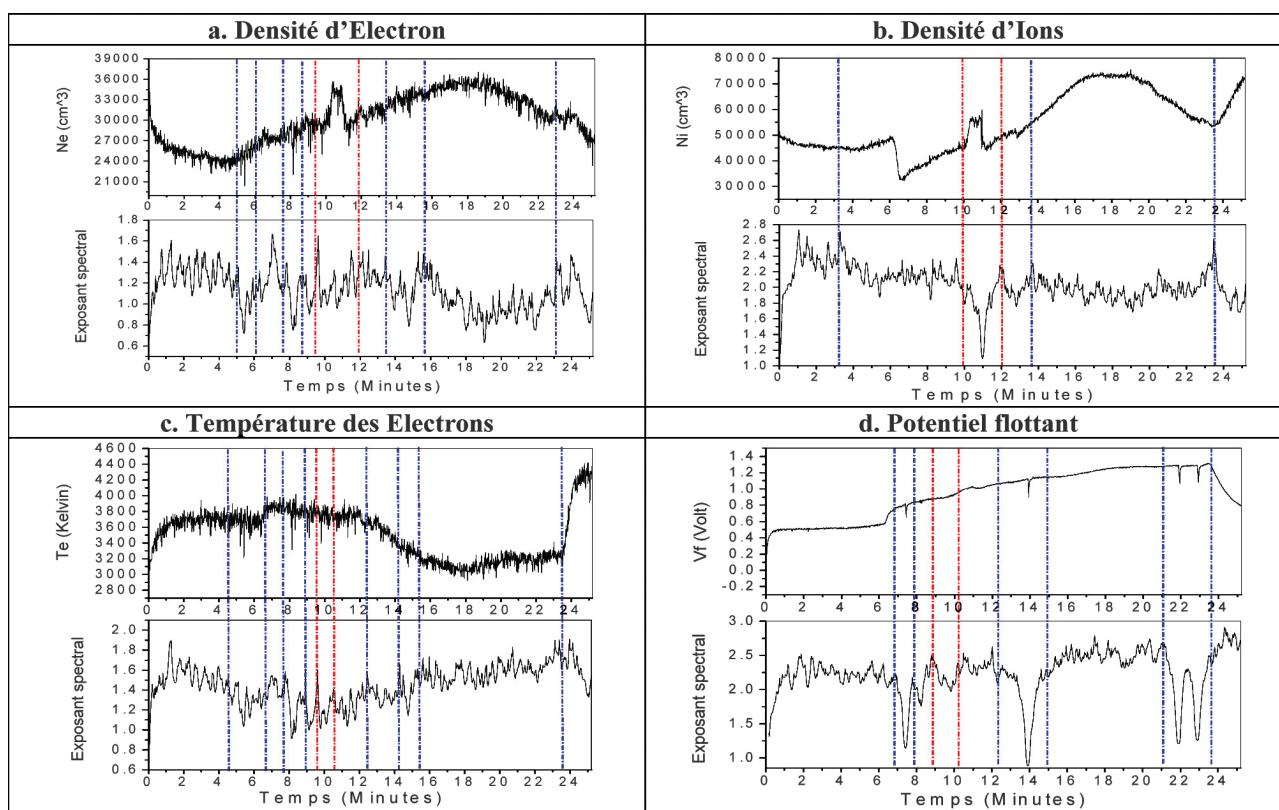
sur les scalogrammes), ce qui classe les signaux séismo-ionosphériques comme des mBf's persistants et anti-persistants ayant une mémoire statistique. Cette propriété de la corrélation à longue portée, implique que ces phénomènes telluriques peuvent se répéter dans le futur de la même manière. Ce qui nous offre la possibilité d'utiliser l'exposant spectral β comme un indice de prédiction de l'activité sismique.

Tab 1. Valeurs des exposants spectraux relatifs aux enregistrements IAP

signal	NH+	NHe+	NO+	Ti	Vs	Vz	PHIX	PHIZ
Exposant spectral moyen	1.5	2.25	2.65	2.4	1.4	1.25	3	2.6

L'analyse par TOC des données ISL, échantillonnées à 1 valeur par seconde montre que les différentes activités sismiques qui génèrent des variations positives ou négatives de la densité électronique et de la densité des ions, sont mises en évidence grâce à l'exposant spectral.

Les fluctuations temporelles des ions et des électrons sont sensiblement reflétées par l'évolution du facteur de rugosité qui traduit tous type de perturbations (voir fig.7). Cet indice nous a permis de mettre l'accent sur des événements importants tel que le précurseur de Honshu (zone limitée en rouge).

Fig. 7 Ensemble des résultats correspondants aux signaux ISL (en haut : le signal et en bas : son exposant spectral $\beta(t)$)

4.3 Discussion des résultats

La haute ionosphère est le siège de plusieurs phénomènes électromagnétiques [Brasseur, 1982] engendrés par des événements telluriques ou externes. Alors pour la séparation des effets séismo-ionosphériques et séismo-électromagnétiques des orages magnétiques, il faut connaître avec précision la situation magnétique de la dernière semaine du mois d'Août 2004.

Conformément aux résultats obtenus avec le logiciel de prévisions de propagation ionosphérique « point à point »,

développés par le Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) de France Télécoms, en collaboration avec l'Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications (ENST), la situation magnétique prédominante durant le mois d'Août 2004 est caractérisée par une activité très soutenue.

Les principaux événements solaires susceptibles d'entraîner des Perturbations Ionosphériques à Début Brusque (PIDB) sont déterminés le : 13, 14, 15 et 18 du mois alors

que le 7^{ème} et le 30^{ème} jour d'août correspondent aux orages magnétiques de moyenne à forte intensité où l'indice planétaire équivaut respectivement le 5 et le 6 sur une échelle de 9. L'activité magnétique relativement agitée de cette fin du mois d'août peut dissimuler l'effet des séismes au niveau de la haute ionosphère (siège de toutes les perturbations). Néanmoins, une étude statistique de l'activité sismique peut la déceler d'une manière indépendante des perturbations magnétiques.

L'interaction des ondes gravito-acoustiques générées par les contraintes et les ondes sismiques avec le plasma est en effet susceptible d'engendrer un déséquilibre de l'ionosphère détectable par tous les enregistrements de DEMETER.

L'ensemble des signaux IAP et ISL, considérés comme des mouvements browniens fractionnaires, ont mis en évidence grâce au traitement par ondelettes, l'activité

sismique générée par le précurseur de Honshu (Tab.2) enregistré le long de la trajectoire N° 838 down de DEMETER. La fractalité des signaux du couple IAP-ISL, résulte de la diffusion élastique.

L'analyse par TOC du domaine fréquentiel allant des UBF (ultra basse fréquence) jusqu'au TBF (très basse fréquence), nous a permis d'obtenir des valeurs de rugosité comprises entre $2 < \beta \leq 3$ ou entre $1 \leq \beta < 2$, ce qui classe les signaux séismo-ionosphériques comme des mouvements browniens fractionnaires persistants et anti-persistants ayant une mémoire statistique. Cette propriété de la corrélation à longue portée, implique que ces phénomènes telluriques peuvent se répéter dans le futur de la même manière ce qui nous offre la possibilité d'utiliser l'exposant spectral β comme un indice de prédiction de l'activité sismique

Tab 2. Précurseur annoncé 5 jours avant le séisme majeur du 5 Septembre 2004

Identification	Date	Temps TU	Latitude (°)	Longitude (°)	Distance satellite Epicentre (km)	Magnitude	Période Du séisme	Région
Précurseur de Honshu	29/08/2004	01:35:54	33.08	136.21	726.81	7	5 à 30 jours	Près de la côte sud Ouest de Honshu, Japon

Le données de type: IMSC et ICE sont caractérisés comme des Sweeps modulés en fréquence et en amplitude, localement browniens. Leur traitement par TOC a révélé l'existence de deux grandes familles de perturbations ionosphériques de nature sismique. La première correspond aux oscillations supposées engendrées par la piézoélectricité ou par une onde gravito-acoustique causée par la déformation des roches sous l'effet des contraintes sismiques de pressions ou de dilatations. La seconde se produit généralement après les séismes et elle est causée par la vibration de l'ionosphère sous le rythme des ondes acoustiques, ondes de gravité ou ondes gravito-acoustiques; cela dépend essentiellement de la localisation géographique de la région sismique. Pour le Japon, ce sont des ondes de type gravito-acoustique. Nous concluons, que les variations des champs électrique et magnétique peuvent renfermer deux régimes bien distincts. Un régime régulier (ou harmonique ou périodique) correspondant à l'oscillation de l'ionosphère sous l'action des ondes générées par l'onde sismique de Rayleigh [Li, 2007].

L'autre est irrégulier (ou aléatoire) causé par les multi-diffusions et le transport du rayonnement électromagnétique par les différentes couches atmosphériques.

Nous remarquons que l'outil ondelettes a fourni une localisation temporelle du précurseur de Honshu, du 29 Août 2004, avant son déclenchement de quelques millisecondes voire même quelques secondes par rapport au catalogue sismique de DEMETER (SEISMIC EVENT).

Les valeurs moyennes locales de l'exposant spectral enregistrées une semaine avant le séisme majeur peuvent être donc considérées comme un indice de localisation temporelle des précurseurs mais également comme un indice qui révèle l'intensité des événements sismiques. La majorité des signaux sismiques qui caractérisent la population du plasma tels que : NH^+ , NHe^+ , Ne, Ni, Te, Vp, Vs et Vz, affichent un exposant spectral compris entre [1.2 -- 1.8] pour un événement isolé de magnitude 7.

Cela nous a permis de faire correspondre aux valeurs de $\beta(t)$ inférieurs à "1.2", la présence de séismes de magnitude supérieurs à 7. Le reste de signaux exploités tels que: NO^+ , Ti, direction du flux des ions et le potentiel flottant ont donné des valeurs de $\beta(t)$ comprises entre [2.1 ----2.6] classant ainsi ces enregistrements comme des mouvements persistants.

Cette analyse réalisée par la TOC, nous a permis de constater que les différents signaux répondent de diverses manières selon leur degré de sensibilité aux perturbations séismo-ionosphériques et séismo-électromagnétiques. La majorité des signaux traités sont donc des mBf's persistants ou anti-persistants, ce qui nous offre la possibilité d'adopter le facteur de rugosité comme un indice de prédiction de l'activité séismique.

5. Conclusion

L'analyse par ondelettes des phénomènes physico-chimiques ou électromagnétiques enregistrés au niveau du plasma ionosphérique a permis de mettre en évidence différentes signatures ionosphériques relatives aux phases pré, co et post-séismique générées par les précurseurs. Cette activité ionosphérique est liée au processus de la diffusion élastique et des multi-diffusions produites par la propagation des ondes séismiques (onde de Rayleigh) dans l'atmosphère.

Nous avons exploité les propriétés de la TOC pour construire un estimateur robuste, permettant de récupérer l'information contenue dans les statistiques locales du signal, qui se manifestent sur différentes échelles temporelles dans l'ionosphère. L'ensemble de nos observations suggère que la variation temporelle de la valeur de l'exposant spectral répond à des propriétés d'invariance d'échelle intrinsèque au modèle de diffusion moléculaire qui régit l'interaction entre les particules du plasma excitées par la propagation d'ondes induites par une activité séismique.

Ces premiers résultats indiquent que ces corrélations pourraient être essentielles dans la compréhension et la prédiction à court terme des séismes, en relations avec les perturbations séismo-ionosphériques.

Références Bibliographiques

- Bernard P., (2003). «*Qu'est-ce qui fait trembler la Terre ?*», EDP Sciences- France.
- Brasseur G., (1982). «*Physique et chimie de l'atmosphère moyenne*», Masson, Paris.
- Herman.F.J, (1997), «*Ascaling medium representation, a discussion on well-logs, Fractals and waves*». Thèse de Doctorat, université de technologie de Delft, Delft, pays-Bas.
- Hölshneider M, (1989). «*Analyse d'objets fractals par transformation en ondelettes*», Thèse de Doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille).
- Lévy P, (1965). «*Processus stochastiques et mouvements Brownien*». Gauthiers-villars.
- Li, F., (2007). «*Etude dans l'ionosphère de la densité électronique et de la turbulence électrostatique en fonction de l'activité sismique*», Thèse de Doctorat, Université d'Orléans (France).
- Lognonne P., Artrub J., Garcia R., Crespon F., Ducic V., Jeansou E., Occhipinti G., Helbert J., Moreaux G. & Godet P-E. (2006). «*Ground-based GPS imaging of ionospheric post-seismic signal*» Planetary and Space Science 54, 528–540.
- Lagoutte D., Brochot J.Y, de Carvalho D., Madrias L & Parrot M. (2006), «*DEMETER Microsatellite wave data processing level 1*», LPCE, CNRS- France.
- Lagoutte D., Brochot J.Y, Madrias L, Parrot M, Poirier B. (2005), «*DEMETER microsatellite scientific mission center data product description*», LPCE, CNRS et l'université d'Orléans- France.
- Lagoutte D., Berthelier J.J., Lebreton J.P., Parrot M. and Sauvaud J.A. (2005). «*DEMETER microsatellite scientific mission center data user guide*» LPCE, CNRS et l'université d'Orléans (France).
- Liu J.Y., Chen Y.I., Pulinets S.A., Tsai Y.B., Chuo Y.J (2000). «*Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes*». Geophysical research letters, Vol, 27, NO-19, pages 3113-3116.
- Mandelbrot B.B, (1983), «*The fractal geometry of nature*». W.H. Freeman, San Francisco.
- Mourad H. (2007). «*Mise en oeuvre d'une méthodologie pour l'étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche*», Thèse de Doctorat de l'université de Limoges- France.
- Occhipinti G. (2006). «*Observations multi-paramètres et modélisation de la signature ionosphérique du grand séisme de Sumatra*». Thèse de Doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris (France).
- Parrot M. (2006). «*Le microsatellite DEMETER*», université d'Orléans (France).
- Pulinets S.A. , Legen'ka A.D. and Alekseev V.A. (1994). «*Pre-earthquake ionospheric effects and their possible mechanisms*». Plenum Press- New York.
- Pulinets S.A. (1998) «*Strong earthquake prediction possibility with the help of topside sounding from satellites*». Adv. Space Res. Vol.21, No.3, pp.455-458. Elsevier Science Ltd edition (Great Britain).
- Torresani. B, (1995). «*Analyse continue par ondelette*». Inter Editions / CNRS éditions.