LA DYNAMIQUE FRACTALE DES PERTURBATIONS SÉISMO-IONOSPHÉRIQUES ENREGISTRÉES PAR LE MICRO-SATELLITE DEMETER

Naima ZAOURAR[1] , Radia MEBARKI[1], Mohamed HAMOUDI[1], Michel PARROT[2]

[1] Laboratoire de Géophysique, FSTGAT, USTHB, BP 32, 16123 Bab-Ezzouar, Alger, Algérie.
E-mail : nzaourar@usthb.dz; mebarki_imen@yahoo.fr; hamoudi@ipgp.jussieu.fr, Tél/Fax: +213 21 24 76 47
[2] LPC2E (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace), 3A Avenue de la recherche scientifique, 45071 Orléans, Cedex 2, France, E-mail: mparrot@cnrs-orleans.fr, Tel.: +332 38515291; fax: +332 38631234.

Soumis le 16 janvier 2010 ; révisé le 15 avril 2010 ; accepté le 13 octobre 2011 - © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n° 2-3, p. 77-90

Résumé

Nous proposons une analyse multiéchelle des perturbations ionosphériques enregistrées par le microsatellite DEMETER. L'analyse spectrale par Transformée de Fourier des séries temporelles obtenues à partir de mesures effectuées par l'Instrument Analyseur de Plasma (IAP) et la sonde de Langmuir (ISL), enregistrées au-dessus du Japon (zone de subduction) et de la Tanzanie (volcanisme), montre que tous les signaux séismo-ionosphériques présentent des spectres en $1/f^{\beta}$, caractéristiques des processus fractals auto affines.

Ainsi, la possibilité que ces séries temporelles présentent des propriétés d'invariance d'échelles associées à des corrélation à longues portées nous a conduit à proposer l'utilisation de la Transformée en Ondelettes Continue comme outil naturel d'analyse des perturbations ionosphériques. Nous montrons que l'estimation d'un exposant spectral local permet de localiser les diverses signatures ionosphériques (pré, co et post-séismiques) engendrées par les évènements séismiques représentés par les précurseurs ou les répliques. En effet, pour toutes les variables physico-chimiques analysées, les exposants spectraux varient dans l'intervalle [1, 3], caractéristique des mouvements browniens fractionnaires. Notons que ces observations sont en parfait accord avec les processus de diffusion élastique mis en jeu dans l'ionosphère. Dans ce contexte, l'aspect novateur de notre démarche est la description quantitative des diverses formes d'expression de la variabilité retracée par les perturbations séismo-ionosphériques qui constituent autant d'éléments clé dans la compréhension et la prédiction à court terme des séismes.

Mots clés *:* DEMETER, ionosphère, fractal, exposant, prédiction séismique

MULTISCALE ANALYSIS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES MEASURED BY DEMETER SATELLITE

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 their various fluid envelopes surrounding it. Such phenomena are of great importance, because they occur between a few hours and a few days before the 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 iono-magnetospheric perturbations

In this study, we address the statistical analysis under the multiscale framework to analyze ionospheric disturbances. Time series generated by complex dynamic systems, exhibit fluctuations on a wide range of time scales and/or broad distributions of the values. In both equilibrium and non-equilibrium situations, the natural fluctuations are often found to follow a scaling relation over several orders of magnitude. Such scaling laws allow for a characterisation of the data and the generating complex system by fractal scaling exponents. The DEMETER data base includes numerous temporal series of measurements. Among the whole data experiment collected on board, we focus on the plasma particle data.

Measurements made by the Instrument Plasma Analyzer (IPA), let us access to a wide range of perturbations indicating the fluctuations of temperature, density (the majority of ions NH^+, NHe^+, NO^+), velocity of local plasma ions and its flow direction. While the Demeter Langmuir Probe Instrument (ISL) measures total density of the plasma, electron temperature and potential of satellite. Spectral analysis of the time series obtained from measurements recorded above of Tanzania (volcanism) exhibits a power law behaviour, typical of fractal self affine process. Thus, the possibility that these time series show the scale invariance associated with long range correlations led us to propose the use of Continuous Wavelets Transformed as a natural tool for investigation of ionospheric perturbations.

For all the analyzed physico-chemical variables, we illustrate that the wavelet based estimator delineate the different ionospheric signatures (before, co and post-seismic) produced by the precursors or the aftershocks seismic events. Let us note that these observations are in good agreement with the elastic diffusion process involved in the ionosphere. Although the underlying causes of the observed fractal scaling are often not identified in detail, the fractal description can be used for modelling the time series and deriving predictions regarding extreme events or future behaviour.

Key words: DEMETER, ionosphere, fractal, exponent, seismic prediction.

1. INTRODUCTION

L'observation satellitaire des enveloppes fluides de la Terre permet l'étude des signatures ionosphériques en liaison avec les phénomènes telluriques, tels les séismes, les tsunamis ou les volcans. DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquakes Regions), premier microsatellite développé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), devrait permettre de mieux appréhender le couplage complexe qui existe entre la Terre solide et ses enveloppes fluides (Parrot, 2006). Ce satellite a été placé le 29 juin 2004, sur une orbite circulaire quasi héliosynchrone (inclinaison de 98,23°) à 715 km d'altitude. Son objectif est d'étudier les perturbations de l'ionosphère associées à l'activité séismique ou volcanique, mais aussi les variations de l'environnement électromagnétique liées à l'activité humaine (Parrot, 2006 ; Li, 2007). La base de données DEMETER, comprend plusieurs séries temporelles de mesures des divers paramètres ionosphériques relatifs à certaines régions, caractérisées par une séismicité variable. Les signaux séismo-ionosphériques obtenus à partir de mesures effectuées par l'Instrument Analyseur de Plasma (IAP) (Berthelier *et al.*, 2006) et la sonde de Langmuir (ISL) (Lebreton *et al.*, 2006) montrent des fluctuations irrégulières sur une importante gamme d'échelle temporelle.

Nous avons choisi le Japon, pour montrer un exemple de séismicité des zones de subductions et la Tanzanie, pour présenter les séismes volcaniques.

A partir de l'étude des séries temporelles enregistrées par Demeter au-dessus du Japon et de la Tanzanie , nous montrons que dans l'espace des fréquences, ces fluctuations présentent des spectres en $1/f^{\beta}$, caractéristiques des processus fractals auto affines. L'étude des corrélations, donc la détermination de l'exposant de la loi puissance qui régit la distribution de la densité spectrale repose sur l'analyse fréquentielle des signaux dont la Transformée de Fourier reste l'outil le plus communément utilisé. Mais cette utilisation systématique se heurte à deux difficultés majeures : d'une part, par nature les signaux stochastiques de type mouvements Browniens fractionnaires (mBf), sont non stationnaires. Le calcul de leur Transformée de Fourier (TF) n'a, à la limite, pas de sens en soi. D'autre part, et surtout, tel ou tel signal peut être fractal par morceau, voire multi-fractal, autrement dit, l'exposant spectral β de la loi puissance, peut varier d'un point à un autre du signal. Dans de tels cas, la TF, parce qu'elle est globale, ne permet pas d'accéder à ces informations locales.

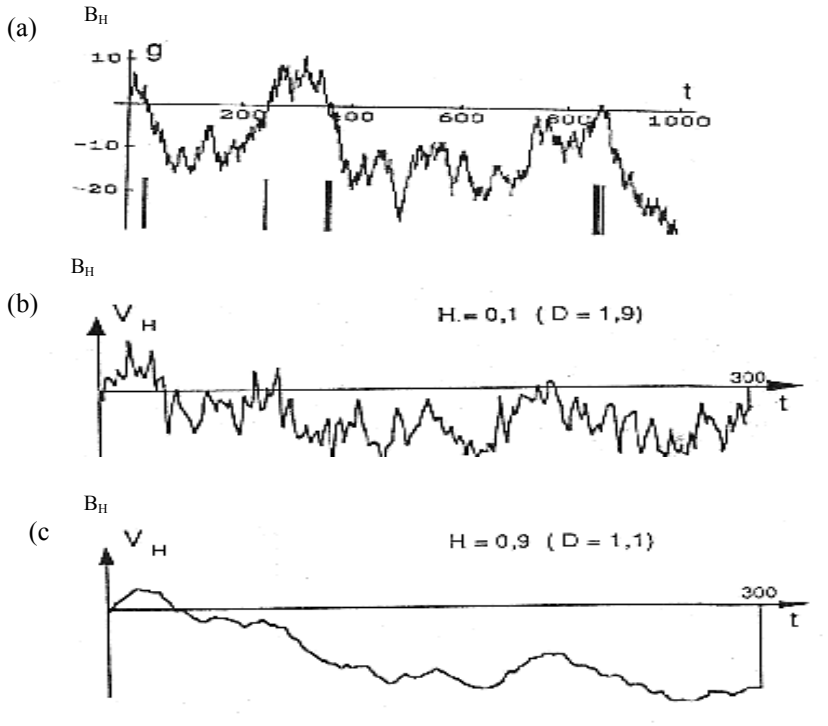
Pour répondre à l'enjeu d'une identification objective de la nature des corrélations que présentent la variabilité des perturbations ionosphériques, nous proposons un algorithme d'analyse des signaux stochastiques (Zaourar *et al*., 2006b) qui tire partie des propriétés de deux techniques puissantes de détection : une analyse locale par Transformée en Ondelettes Continue (TOC) combinée à l'utilisation des propriétés multiéchelles des signaux. Au travers de l'étude des diverses signatures ionosphériques (pré, co et post-séismiques) engendrées par les évènements séismiques représentés par les précurseurs ou les répliques, nous explorons toute la richesse d'information décrite par l'exposant spectral de la loi d'échelle.

Les étapes clé de notre démarche se rapportent essentiellement à la vérification du comportement en loi d'échelle des perturbations seismo-ionosphériques. Nous montrons que le comportement local en loi d 'échelle tel que le mesure l'exposant spectral par TOC n'est pas constant, mais varie sur un intervalle de valeurs possibles, imprimant ainsi une structure riche au processus analysé.

2 .MÉTHODOLOGIE

2.1 Modélisation des processus à invariance d'échelle

Diverses études au cours de ces dernières années ont montré que de multiples domaines d'application recouvrant les tremblement de terre (Enescu *et al*., 2006), les feux de forêts (Malamud *et al*., 1998), les rythmes cardiaques (Peng *et al*., 1995), les coordinations motrices (Gilden *et al*., 1995), les fluctuations financières (Mandelbrot, 2005; Kiyono *et al*., 2006), les perturbations géomagnétiques (Wanliss and Dobias, 2007 ; Zaourar *et al.*, 2008), ont révélé la présence de comportement en loi d'échelle. A vu de ces travaux, ces comportement appelés processus en « $1/f$ », f étant la fréquence, sont considérés comme une manifestation plus ou moins universelle de la variabilité des signaux à structures complexes.



Le mouvement brownien fractionnaire (mBf) introduit par Mandelbrot et Van Ness en 1968, est l'un des modèles mathématiques les plus utilisés pour décrire les fluctuations aléatoires des processus à invariance d'échelle. C'est un processus gaussien centré $B_H = \{B_H(t),\ t \in \Re\}$ de paramètre de Hurst H ($0 < H < 1$) à moyenne nulle. Ses incréments sont stationnaires et $B_H(0) = 0$. Sa fonction de covariance s'écrit :

$$E\{B_H(t)B_H(u)\} = \frac{\sigma^2}{2}\left[|t|^{2H} + |u|^{2H} - |t-u|^{2H}\right] \qquad (1)$$

Le symbole E étant relatif à l'espérance mathématique et σ la variance des fluctuations.

Le mBf présente un comportement statique d'échelle dans le sens où il possède des propriétés statistiques d'auto affinité d'ordre H, c'est-à-dire que si on dilate un tel processus par un facteur λ, on retrouve le même processus amplifié par un facteur λ^H: $B_H(\lambda t) \equiv \lambda^H B_H(t)$, où $\equiv$ signifie l'égalité des distributions de dimension finie. Notons que dans la littérature, l'autosimilarité est souvent confondue avec l'auto affinité. La trace B_H nécessite un facteur d'échelle différent pour les deux coordonnées : λ pour t et λ^H pour B_H. Cette relation d'échelle étant non isotrope, le mBf est un processus auto affine.

Dans l'espace des fréquences, la densité spectrale des mBf est proportionnelle à l'inverse de la fréquence (Mandelbrot and Ness, 1968) :

$$S(f) \sim f^{-\beta} \qquad (2)$$

L'exposant de la loi puissance : $\beta = 2H + 1$, est une fonction linéaire du nombre de Hurst H caractéristique des processus fractals. Pratiquement, l'exposant spectral β représente la pente du spectre de puissance dans un diagramme en échelle log- log.

L'intérêt du mouvement brownien fractionnaire, illustré par la figure 1 (Gouyet, 1992), réside dans la possibilité d'introduire une corrélation entre les accroissements.

Comme illustré par la figure 1 (b), pour $\beta < 2$ ($H = 0{,}1$), les accroissements sont corrélés négativement (le mouvement est dit anti-persistant) et les trajectoires sont d'autant plus irrégulières que β est plus proche de 1. Pour $\beta > 2$ ($H = 0{,}9$), la figure 2 (c) montre que les accroissements sont corrélés positivement et les trajectoires tendent à être d'autant plus régulières que β se rapproche de 3. Le mouvement est dit persistant à la fois pour les incréments et pour sa dérivée. La dérivée du mBf formulée par $G_H(t) \approx \Delta t \dfrac{\delta(B_H(t))}{\delta(t)}$ où Δt est le pas d'échantillonnage temporel et $\approx$ signifie une

égalité en loi, décrit le bruit Gaussien fractionnaire (bGf). Notons que pour le bGf, l'exposant spectral varie dans l'intervalle [-1, 1].

Enfin, la figure 1 (a) indique le cas du mouvement brownien ordinaire avec $\beta = 2$, ($H = 1/2$), où les corrélations sont nulles, confirmant que les accroissements sont dans ce cas, statistiquement indépendants.

L'étude des signaux modélisés par des processus à invariance d'échelle nécessite le développement d'outils puissants capables d'analyser des phénomènes à plusieurs échelles, tant sur le plan théorique que du point de vue algorithmique. Dés leur apparition, les techniques d'analyse par ondelettes ont été appliquées à l'analyse fractale des signaux irréguliers.

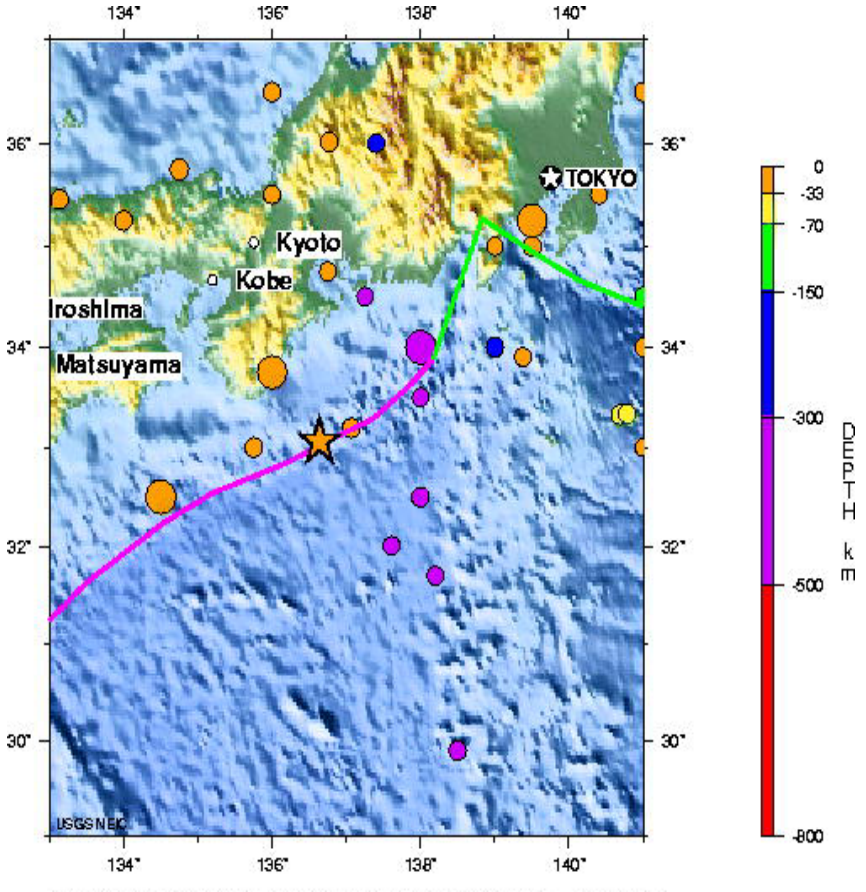


Figure 2 : Localisation des foyers de magnitude supérieure à 7. L'étoile jaune représente le foyer du séisme du 5 septembre 2004 à 10:07:07 (TU) (Tiré de http://neic.usgs.gov).
Home location of seismic magnitude greater than 7. The yellow star represents the focus of the earthquake of September 5, 2004 at 10:07:07 UT (From http://neic.usgs.gov).

2.2 La Transformée en Ondelettes Continue

La transformée en Ondelettes Continue (TOC) du signal *s(t)* à la position b et à l'échelle *a* est définie par l'équation (Grossmann and Morlet, 1984):

$$W_s(a,b) = \langle s, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi_{ab}^{*}(t) dt \qquad (3)$$

dans laquelle $\langle .,. \rangle$ représente le produit scalaire des deux fonctions dans $L^2(R)$ et ψ^* le complexe conjugué de ψ.

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \qquad (4)$$

Les fonctions élémentaires ψ_{ab} (t) sont construites en dilatant l'ondelette mère ψ par le facteur $a \in R_+^*$, et en la translatant par le paramètre $b \in R$. Une ondelette est une fonction $\psi \in L^2(R)$, de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0. \quad (5)$$

Pour que la TOC satisfasse l'intuition d'une représentation conjointe en temps et en fréquence de l'information contenue dans le signal *s(t)*, l'ondelette mère doit être une fonction à la fois bien localisée en temps et en fréquence. Cette condition se traduit dans le domaine de Fourier par la condition d'admissibilité :

$$c_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi(f)|^2}{f} df \prec \infty \quad (6)$$

qui contient la restriction exprimée par la relation (5).

2.3. Analyse en ondelettes de processus à invariance d'échelle

L'approche multi échelle inhérente à la TOC paraît alors l'outil le mieux adapté pour exploiter l'invariance d'échelle manifestée par les fluctuations ionosphériques.

Le choix de l'ondelette analysante est fonction du problème traité. Dans le cadre de l'analyse des signaux fractals, l'ondelette de Morlet complexe est utilisée à cause de sa bonne localisation à la fois en temps et fréquence et de son nombre important de moments nuls. Une ondelette qui a n_ψ moments nuls :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^n \psi(t)dt = 0, \quad pour \quad 0 \le n \prec n_\psi \quad (7)$$

est orthogonale au polynôme de degré inférieur ou égal à son nombre de moments nuls. Autrement dit, les coefficients d'ondelettes calculés à partir d'une ondelette à n_ψ moments nuls reflètent l'information manifestée par les comportements plus irréguliers que la tendance polynomiale du signal analysé.

Les coefficients d'ondelettes obtenus par la décomposition d'un processus auto-affine d'ordre *H* comme le mouvement brownien fractionnaire par exemple (Holschneider, 1995) vérifient une relation d'invariance décrite par l'équation :

$$W_s(\lambda a, t_0 + \lambda b) \approx \lambda^{H+\frac{1}{2}} W_s(a, t_0 + b) \quad (8)$$

Cette propriété fait de la TOC un outil particulièrement bien adapté pour caractériser et fournir une description multi échelle des signaux fractals.

Dans l'algorithme spécifique mis en œuvre, nous avons adopté l'approche proposée par Zaourar *et al. (*2006a) basé sur le théorème de Plancherel suivant lequel la Transformée de Fourier du produit de convolution de deux fonctions est égal au produit simple de leurs Transformées de Fourier respectives. Elle consiste donc en un produit des Transformées de Fourier du signal et de l'ondelette dans l'espace des fréquences moyennant certaines adaptations telles que : *b* = *t*, qui signifie que la translation *b* de l'ondelette est effectuée pour chaque instant t du signal, $f = \frac{2\sqrt{\alpha}}{a}$ correspond à la fréquence et α une constante contrôlant la forme de l'ondelette.

En tout point de l'espace temps - fréquence exploré, le scalogramme est défini par le carré des coefficients d'ondelettes :

$$P(f,t) = |W_s(f,t)|^2 \quad (9)$$

La forme particulière que prend la densité spectrale dans sa représentation sous la forme d'une carte temps-fréquence permet de déduire le comportement asymptotique de la structure de dépendance des coefficients d'ondelettes. Aux hautes fréquences, le spectre de puissance peut être approximé par une loi de puissance (Flandrin, 1998) :

$$p(f,t) \approx f^{-\beta(t)} \quad (10)$$

Où :

$$\beta(t) = 2h(t) + 1 \quad (11)$$

L'exposant spectral local β(t) appelé aussi exposant d'échelle, décrit les changements locaux de cette loi. D'un point de vue mathématique, l'exposant de Hölder *h(t)* est égal au paramètre *H* à chaque instant t. Il quantifie « la force » de la singularité localisée en ce point. Autrement dit, l'exposant de la loi d'échelle $\beta(t)$ caractérise les propriétés statistiques de corrélation du processus sans aucun *a priori* quant à la structure du signal. Son estimation à travers l'intervalle temporel étudié est réalisée par la mesure de la pente dans un diagramme (*log* (spectre de puissance)- *log* (fréquence).

3. PRÉSENTATION DES DONNÉES

3.1 Description des signaux traités

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://smsc.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.

3. 2 Arrangement des données

La récupération des données se fait par l'intermédiaire de la station de télémesure située au CNES à Toulouse. Les mesures sont réalisées selon deux modes principaux d'opération : (i) le mode continu (Burst) pour enregistrer les données élevées de débit binaire, fonctionnel quand le satellite est au-dessus des régions séismiques et (ii) le mode d'aperçu (Survey) plus adapté pour enregistrer les basses données de débit binaire**.** Soulignons que les paramètres physiques que nous avons choisis de traiter sont pour la plupart enregistrés selon les deux modes fonctionnels du satellite.

Nous avons analysé les séries temporelles détectées par Demeter à partir de mesures effectuées par l'Instrument Analyseur de Plasma (IAP) et la sonde de Langmuir (ISL). L'Instrument Analyseur de Plasma (IAP) est caractérisé par une résolution en temps égale à 2, 317s pour les données en mode continu et 4, 506s pour les données en mode surveillance. La résolution temporelle de l'Instrument Sonde de Langmuir (ISL) est égale à une seconde pour les deux modes. Une demi-orbite s'étend environ sur une demi heure, voire plus, d'enregistrements en mode surveillance et en mode continu qui sont stockés dans des fichiers séparés. Il faut par la suite les recombiner pour pouvoir reconstituer toutes les mesures effectuées par DEMETER tout au long de la trajectoire de cette demi-orbite. Pour les données IAP, il faut effectuer un ré échantillonnage du mode continu avant de restaurer le signal total.

Pour les mesures ISL, nous constatons qu'il suffit de déterminer les moments d'enregistrements en mode continu pour ensuite les injecter dans le fichier d'aperçu, afin d'obtenir le fichier de données complet.

Nous présentons dans ce qui suit les deux perturbations ionosphériques pouvant être liées à l'activité séismique que nous avons analysé, relatives à deux régions différentes. Notons que le choix des régions étudiées n'est pas arbitraire, mais il est effectué d'une manière à couvrir les diverses séismicités présentant des particularités telles que les zones de subduction et les zones volcaniques.

4. ANALYSE FRACTALE DES SIGNAUX SÉISMO-IONOSPHÉRIQUES

4. 1 Précurseur séismique du Japon

La séismicité de la côte Sud de Honshu au Japon est due essentiellement à la subduction de la plaque océanique des Philippines au dessous de la plaque Eurasiatique avec une vitesse de 40 mm/an. L'une des conséquences de ce choc, est le séisme du 05 septembre 2004 à 10:07:07 (TU) causé principalement par une faille inverse. Cet événement s'inscrit parmi les plus importantes activités séismiques de l'année 2004. Son foyer est localisé à 14 km de profondeur dans la croûte prés de la côte Sud Ouest de Honshu à 33°, 06N de latitude et 136°, 64E de longitude comme illustré par la figure 2.

Tout au long de son orbite 838 descendante du 29 aout 2004, que nous reportons en figure 3, DEMETER effectue des enregistrements de diverses natures sur un intervalle de 25 mn. Le temps initial de l'enregistrement de cette orbite est égale 01h: 25mn:39s:292ms et le temps final est 01h:50mn:45s:959ms, correspondant respectivement aux coordonnées suivantes :

latitude = 69°, 6132 - longitude = 155°, 021 et latitude = -19°, 9737 - longitude = 122°, 663. Les mesures effectuées par le réseau séismologique japonais au sol sont aussi exploitées. La figure 4 montre les données de la demi-orbite N° 838 passant au dessus du japon le 29 août 2004 à 01h:26mn:00s. Nous résumons dans le tableau 1 les principales perturbations ionosphériques enregistrées le long de cette demi-orbite.

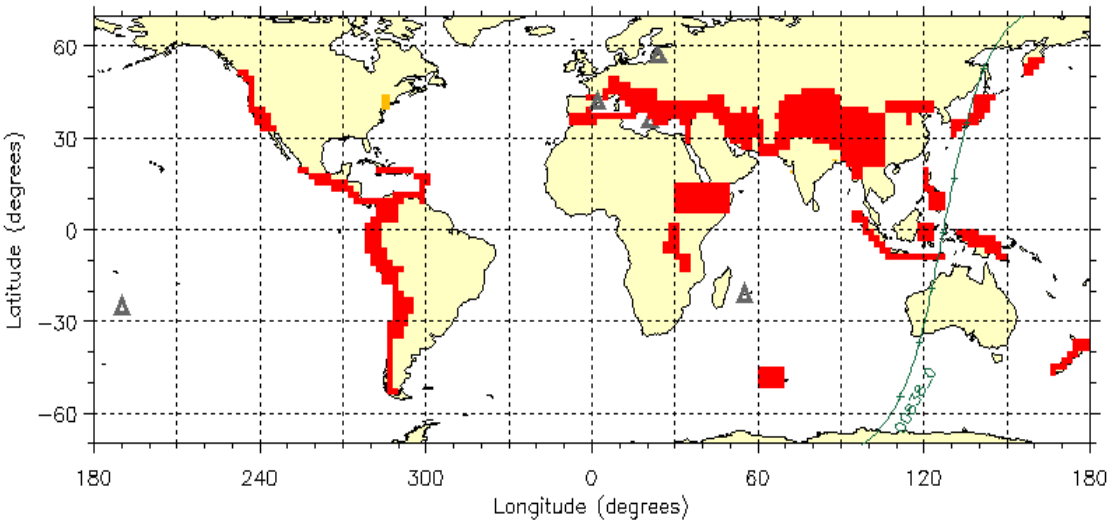


Figure 3 : Orbite descendante N° 838 passant au-dessus du Japon (serveur de Demeter).
Descending orbit N°. 838 passing over Japan. (Demeter server)

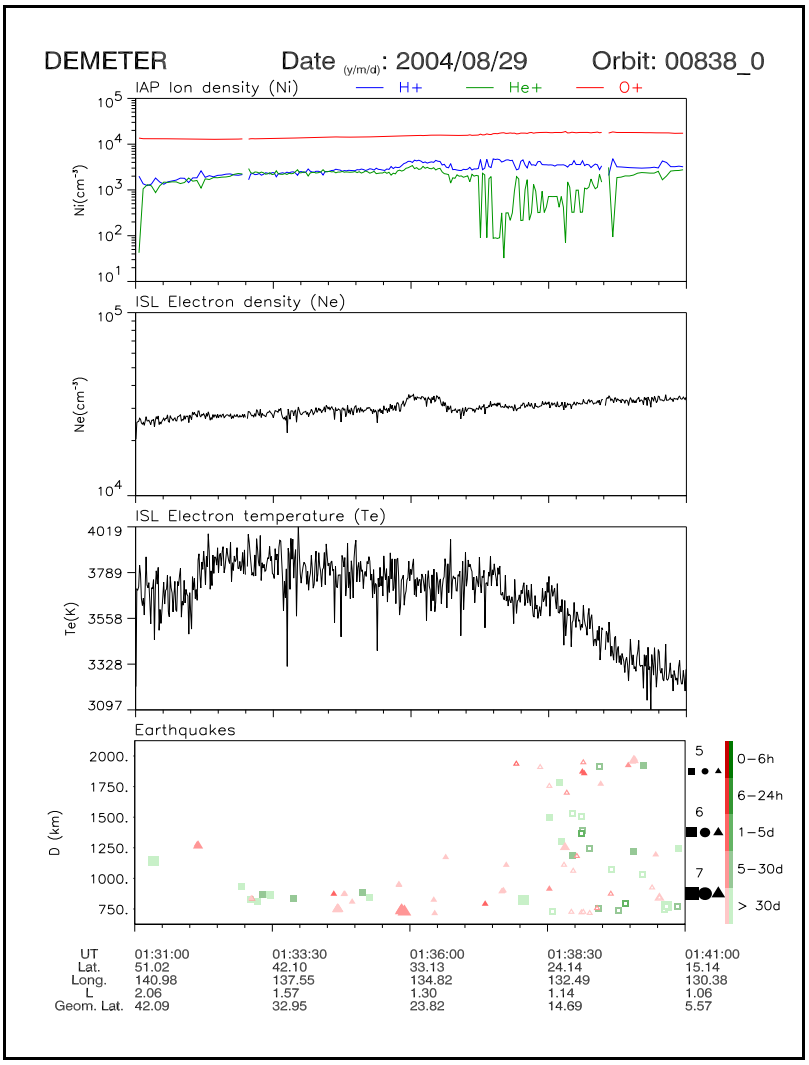


Figure 4 : Exemple de données enregistrées par Demeter : densité des ions mesurée par IAP, densité et température électronique mesurée par ISL. Le dernier panneau montre les positions des séismes observées par Demeter le long de la demi-orbite. L'échelle de couleurs représente l'intervalle de temps entre le séisme et l'orbite. Les triangles rouges et les carrés verts montrent les événements pré-séismiques et post-séismiques respectivement.
Example of data collected by Demeter. The frames, from top to bottom, show, the IAP ion density, the ISL electron density and temperature and the earthquake frame. The color-scale represents the time interval between the earthquake and the orbit. Red triangles and green squares whose sizes are proportional to seismic magnitude, show the pre and post-seismic events respectively.

Le catalogue séismique de DEMETER signale un précurseur de magnitude 6, détecté 1 à 5 jours avant le fort séisme de Honshu du 05 septembre 2004. Pour la mise en évidence des perturbations liées à ce séisme, nous avons analysé deux types de données recueillies par DEMETER :

- Les données IAP comprenant la densité d'hydrogène (NH+), la densité d'Hélium (NHe+), la densité d'Oxygène (NO+), la température des Ions (Ti), le potentiel du Satellite (Ps), la vitesse des ions suivant l'axe des Z (Vz) ainsi que les angles (V, OX) et (V, OZ).

- Les données ISL constituées par la densité des électrons (Ne), la température des électrons (Te), le Potentiel du Plasma (Ps) ainsi que le Potentiel flottant (V).

4. 1.1 Mise en évidence des propriétés d'invariance d'échelle des signaux

Nous avons considéré les données sur un intervalle de 6 jours avant l'événement séismique majeur afin de mettre en évidence toutes les perturbations ionosphériques de nature séismique qui peuvent être enregistrées à cette date. L'analyse spectrale des signaux est effectuée sur l'intervalle temporel t∈ [01h:25mn:39s:292ms-01h:50mn:45s:959ms].

Pour les données IAP, l'intervalle des fréquences $f \in [10^{-3},\ 6]Hz$, le pas d'échantillonnage est de 4,506 secondes et $N_{IAP} = 329\ \ échantillons$, alors que pour les données ISL, l'intervalle des fréquences $f \in [10^{-3},\ 29]Hz$, avec un pas d'une seconde et $N_{ISL} = 1486\ échantillons$. Pendant les périodes d'activité séismique intense, l'état normal de la haute ionosphère est perturbé par le déséquilibre de plusieurs constituants du plasma local.

Nous reportons dans la figure 5 les résultats de l'analyse spectrale par Transformée de Fourier de ces deux séries temporelles. Nous observons que tous les spectres manifestent d'incontestables comportements dits en $1/f^{\beta}$ caractéristiques des signaux non stationnaires auto affines. Les exposants spectraux, calculées par ajustement au sens des moindre carrées, varient globalement dans l'intervalle [1, 3]. En accord avec le paragraphe 2.1, ces premiers résultats confirment que les fluctuations statistiques des perturbations séismo-ionosphériques s'apparentent donc bien à des mouvements browniens fractionnaires.

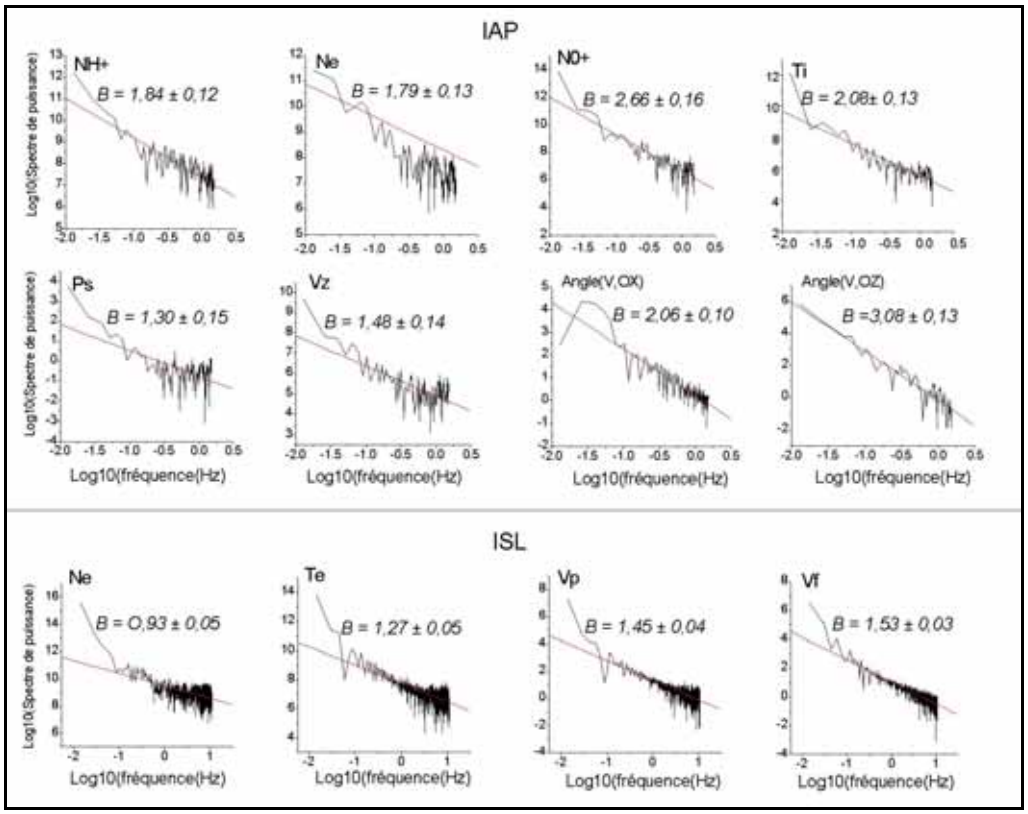


Figure 5 : Spectres globaux calculés par TF des signaux collectés par les sondes IAP- ISL pour l'orbite 838 au-dessus du Japon. Les pentes des droites de régression en trait rouge représentent les valeurs de l'exposant spectral.
Fourier spectra of the IAP and ISL probes data collected during the half-orbit N°838 over Japan

4.1.2 Traitement par ondelettes des séries temporelles

Dans cette partie, nous cherchons à décrire les effets conjoints des conditions de réalisation de la mesure de ces séries temporelles et des caractéristiques du milieu ionosphérique sur la variabilité du signal. Dans cette perspective, nous proposons l'estimation d'un marqueur des fluctuations : l'exposant spectral.β(t).

La visualisation de tous ces signaux rassemblés dans les figures 6 et 7 dénote l'aspect irrégulier qui les caractérise. Leur variabilité est distribuée sur une grande gamme d'échelle. Nous avons montré dans le paragraphe 2.3 que pour caractériser les fluctuations locales généralement présentes dans les régimes browniens, il suffit d'étudier le comportement de la transformée en ondelettes du signal aux petites échelles.

Dans l'algorithme de calcul de la TOC mis en œuvre (Zaourar *et al*., 2006a, 2006b), nous avons utilisé l'ondelette de Morlet sous la forme particulière suivante :

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-t^2} e^{-2i\sqrt{\alpha}t} \qquad (12)$$

Les paramètres d'entrée de l'algorithme sont :

- les valeurs limites des fréquences calculées en fonction du nombre d'échantillons N et du pas d'échantillonnage Δt .La fréquence minimale $f_{min} = 1/N\Delta t$ est imposée par la longueur du signal, la fréquence maximale $f_{max} = 1/2\Delta t$,

- la bande des fréquences explorée définie par des fréquences centrales localisées, est divisée en 60 voies réparties uniformément sur une échelle logarithmique : $f_n = f_0 10^{n.d}$ avec d le pas d'échantillonnage en fréquence et f_0 la première fréquence centrale,

- le paramètre de forme de l'ondelette α est 40.

Nous calculons suivant l'équation (9) le spectre de puissance $P(f,t)$. Rappelons que ce spectre vérifie une relation d'échelle donnée par l'équation 8. Ainsi, pour un temps donné t_0, $P(f,t_0)$ décrit les variations d'énergie suivant les différentes échelles ou fréquences. Autrement dit, pour chaque coupe en temps du scalogramme d'un signal, la régression linéaire (en échelle bi-logarithmique) réalisée sur la décroissance régulière des coefficients d'ondelettes permet d'estimer un exposant local du signal.

En pratique, l'estimation de la densité spectrale se ramène à l'estimation de l'exposant local β(t) donnée par l'équation (10) sur une bande de fréquence calculée par la mesure de la pente dans un diagramme (*log* (spectre de puissance)- *log* (fréquence)).

Les figures 6 et 7 résument les résultats de traitement par TOC en regard avec les séries temporelles collectées par les sondes IAP et ISL mentionnées ci-dessus. Le trait discontinu vert marque la transition de phase de l'exposant β(t) du régime persistant (β(t) > 2) vers un régime anti-persistant (β(t) < 2).

Conformément aux prédictions théoriques (paragraphe 2.3, équation 7), les variations temporelles des exposants spectraux manifestent plus d'irrégularités que les mesures exemptes de leurs parties régulières. Dans tous ces cas de figures, on relève que la corrélation entre les signaux et leurs exposants spectraux montre que les valeurs les plus faibles de β(t) coïncident avec les moments les plus perturbés. En effet, les exposants spectraux de tous les paramètres analysés retracent le précurseur de Honshu (zone limitée en rouge), localisé à l'instant t = 10mn :15s par rapport au temps initial égal à 01h:25mn:39s:292ms. On peut aller au-delà de cette remarque qualitative en observant que toutes les fortes perturbations ont une signature en termes d'exposant : elles sont caractérisées par une augmentation brutale de β(t), suivie par une décroissance progressive vers les plus faibles valeurs de β(t). Ces transitions de phase, montrent que juste avant le déclenchement du précurseur, les exposants β(t) affichent des valeurs de 3 pour NO+, 2, 8 pour NHe+, 2, 5 pour Ti, et environ de 3 pour les angles (V, OX) et (V, OZ), marquant ainsi une forte corrélation entre les données contenues dans ces cinq séries. Dans cet intervalle, une forte densité de l'oxygène atomique (NO+) est accompagnée par une chute considérable d'Hélium. Ces deux évolutions opposées sont caractérisées par des valeurs de β(t) supérieures à 2 qui indiquent une persistance statistique dans les données. Les signaux NH+, Ps ainsi que Vz avec des valeurs : 1, 20 < β(t) < 2 reflètent, par contre, un comportement anti-persistant, indiquant une corrélation faible entre les données. En raison de sa légèreté, l'hydrogène diminue très lentement pendant les séismes, ce qui justifie les pics de densité NH+ retracés par une diminution progressive de β(t) correspondant aux régions les plus actives. Notons aussi que la transition vers un régime totalement anti-persistant est observée sur les exposants des signaux Ps et Vs en accord avec une plus forte variabilité qui caractérise leurs évolutions temporelles.

Les zones à forte densité hypocentrale (marquées en bleu) représentant une série de répliques et de précurseurs de magnitude 5 et 6 sur l'échelle de Richter sont également bien retracées par les exposants spectraux. Le comportement de β(t) est analogue au précédant, marqué par une augmentation relative à l'approche des répliques suivi par une diminution au moment du déclenchement de la perturbation. Comme illustré par la figure 6, ces transitions sont particulièrement bien soulignées par les exposants des signaux relatifs aux angles (V, OX) et (V, OZ).

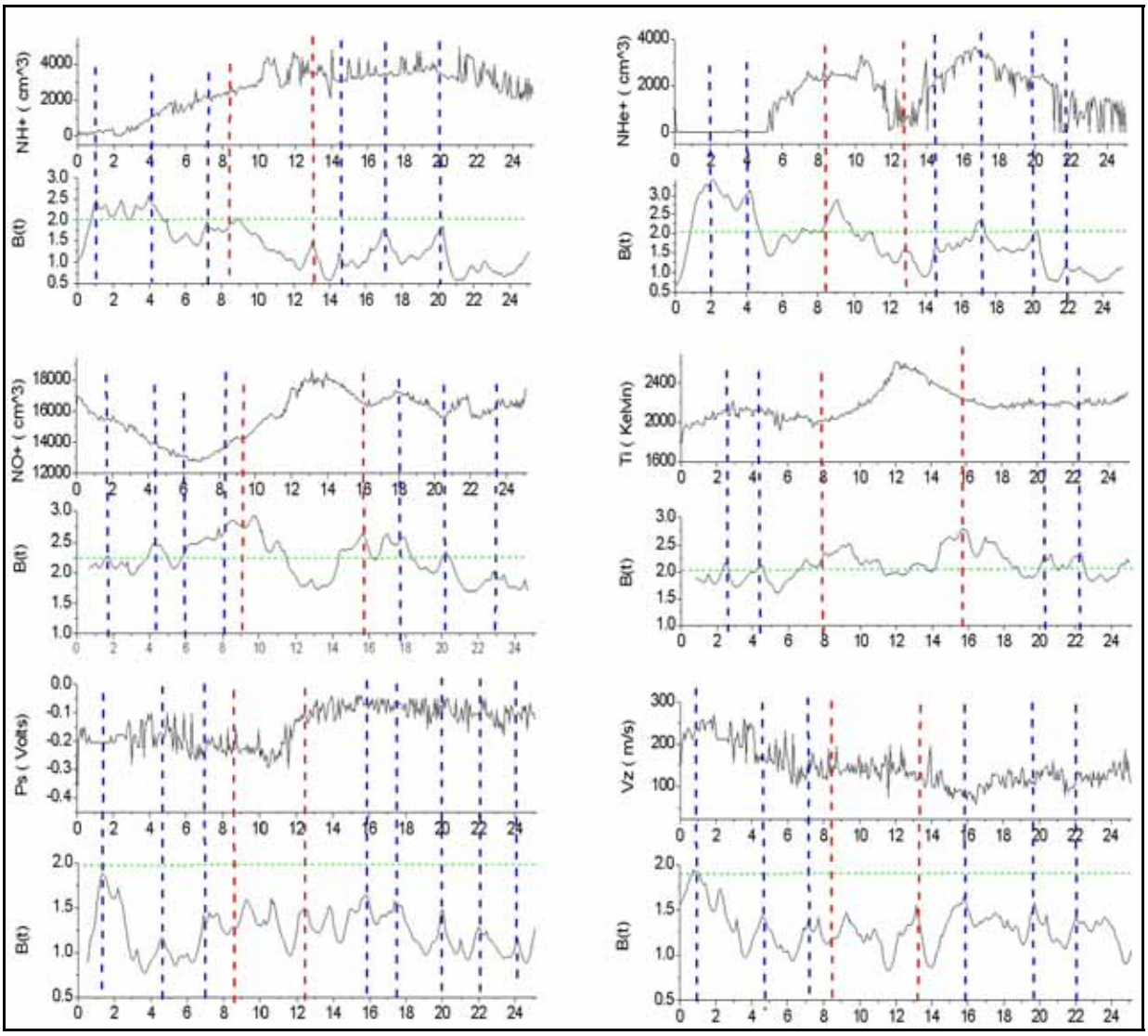


Figure 6 : En haut : signaux IAP : NH+, Ne+, NO+, Ti, Ps, Vz, les angles notés phix (V, OX) et phiz (V, OZ). En bas : évolution temporelle des exposants spectraux correspondants. Les traits discontinus délimitent : (rouges) le précurseur de Honshu localisé à t = 10 mn, (bleus) une série de précurseurs et de répliques. Le trait discontinu vert marque la transition de phase du régime persistant vers le régime anti-persistant

Top : IAP data: NH+, Ne+, NO+, Ti, Ps, Vz, *the angles labelled* phix (V, OX) *and* phiz (V, OZ). *Bottom: Time evolution of the corresponding exponent spectra. Dashed lines outline in red the Honshu seismic precursor located at t=10 mn. The blue ones delineate some minor precursors and aftershocks. The green dashed line marks the persistent and anti-persistent behaviour phase transition*

La figure 7 montre que le traitement des données ISL par TOC apporte un gain substantiel d'information, imprimant une information riche aux évolutions temporelles des exposants spectraux. Les différentes transitions, induites par les activités séismiques, enregistrées au cours de la trajectoire N° 838 de DEMETER sont bien mieux différenciés par les exposants spectraux que par les signaux. Un des résultats les plus marquants de notre graphe de régularité est le fort contraste de variabilité entre les signaux Vf et Vp mesurés par ISL et leurs exposants spectraux, visibles sur la figure 7, marqués par de fortes fluctuations comparativement à la monotonie de leur mesure. Le précurseur de Honshu (zone limitée en rouge), est comme précédemment marqué par une augmentation brutale du $\beta(t)$, suivie par de très petites valeurs correspondant aux pics d'amplitude, particulièrement bien illustré sur le signal Ne. Pour les signaux mesurés par la sonde ISL, les exposants ont des valeurs $\beta(t) < 2$ (toutes les fluctuations sont pratiquement en dessous du trait discontinu vert). Ils varient dans l'intervalle [1, 21, 1, 178] et sont à nouveau tout à fait compatibles avec ceux des mouvements browniens fractionnaires anti-persistants sauf pour le potentiel flottant Vf marqué par $\beta(t)$ légèrement supérieur à 2 sur certains intervalles temporels.

Ces valeurs d'exposants indiquent que les mesures ISL semblent donc beaucoup plus sensibles aux fluctuations locales, induites par les variations rapides des processus physiques sous-jacents.

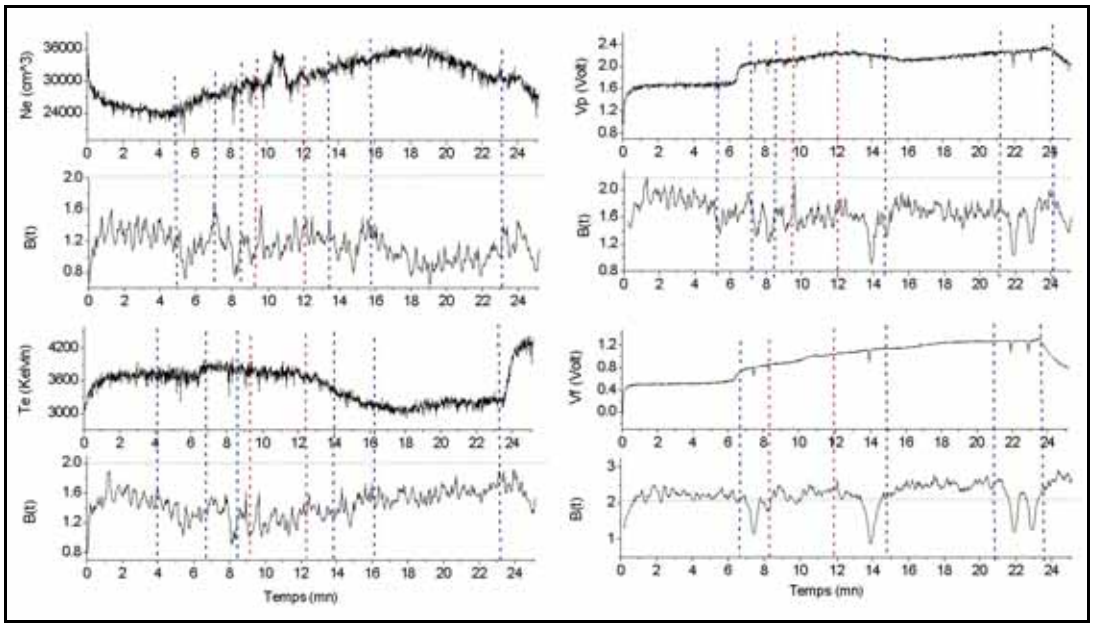


Figure 7 : En haut : signaux collectés par la sonde ISL : Ne, Te, Vp et Vf. En bas : évolution temporelle des exposants spectraux correspondants Les traits discontinus délimitent : (rouges) le précurseur de Honshu localisé à t = 10 mn, (bleus) une série de précurseurs et de répliques. Le trait discontinu vert marque la transition de phase du régime persistent vers le régime anti-persistant.
Top: ISL data: Ne, Te, Vp and Vf. Bottom: Time evolution of the corresponding exponent spectra. Dashed lines outline in red the Honshu seismic precursor located at t=10 mn. The blue ones delineate some minor precursors and aftershocks. The green dashed line markse the persistent and anti-persistent behaviour phase transition.

4.2 Précurseur séismique de la Tanzanie

Le nord de la Tanzanie a connu, en juillet, août et Septembre 2007, une activité tectonique très particulière, caractérisée essentiellement par des émissions de lave du volcan Old Doinyo Lengai (2890m) accompagnée de secousses et d'explosions importantes. Parmi les événements séismiques les plus remarquables de cette période, nous citons le séisme du 17 juillet à 14:10:42 TU. Ce séisme survenu à 8 km de profondeur est caractérisé par une magnitude de 5,9 sur l'échelle de Richter. L'épicentre de ce séisme est identifié par ces coordonnées de 2, 586°S de latitude et 36, 281°E de longitude ce qui explique sa localisation à 80 km au NNW de Arusha comme indiquée sur la figure 8.

Nous cherchons dans cette partie, la présence des anomalies séismo-ionosphériques afin d'expliquer les conditions qui règnent au niveau de l'ionosphère 6 heures avant le séisme majeur.

La figure 9 montre la demi-orbite N° 16229 exploitée, passant au dessus de la Tanzanie le 17 Juillet 2007 à 07h:50mn:15s. Suivant cette trajectoire, DEMETER enregistre diverses signatures ionosphériques sur une large bande fréquentielle et sur un intervalle d'environ 40 minutes. Le temps initial d'enregistrement de cette orbite est 07h:29mn:41s : 472ms, le temps final est 08h:07mn:59s:782ms, correspondant respectivement aux coordonnées suivantes : latitude = 71°, 4492, longitude = 65°, 7080 et latitude = -66°, 1392, longitude = 12°.

L'exploitation du catalogue séismique fourni par le fichier SEISMIC_EVENT 2007 de DEMETER, révèle la localisation d'un précurseur de magnitude 5 qui se produit prés d'Arusha (de coordonnées géographique de -2°, 345 de latitude et de 35°, 6 de longitude), 6 à 24 heures avant la secousse principale. Plus précisément le 17 juillet 2007 à 07h:50mn:15s, le microsatellite DEMETER passe en mode continu à 07h:56mn:32s:773 au dessus de la région séismique décrite par les coordonnées: 25°, 2143 de latitude et 30°, 3341 de longitude, représentée par la figure 9.

Analyse par ondelettes des séries temporelles

Dans la première partie de notre étude, nous avons montré que les signaux de type IAP et ISL, liés à l'évolution temporelle des divers éléments chimiques du plasma ionosphérique, se comportent comme des mouvements browniens fractionnaires. L'étude des signaux du précurseur d'Arusha collectés par les sondes IAP et ISL est menée afin de montrer la capacité de notre exposant spectral dans la détection d'événements séismiques caractérisés par une magnitude critique égale à 5 dans ce cas. En effet, rappelons que la magnitude 5 est donnée comme une magnitude critique au dessous de laquelle on ne pense pas pouvoir détecter d'événement séismique à l'altitude du satellite.

Nous résumons dans les figures 10 et 11, les résultats de l'analyse par TOC des séries temporelles enregistrés par les sondes IAP et ISL respectivement.

Comme pour l'exemple du Japon, les exposants spectraux de tous signaux montrent pratiquement un comportement similaire : une phase ascendante juste avant le déclenchement du précurseur d'Arusha localisé à t = 20mn par rapport au

temps initial suivie par une diminution plus au moins rapide vers la valeur la plus faible correspondant au moment de son déclenchement.

Comme le montre la figure 10, ces transitions bien visibles sur les courbes de régularités des exposants relatifs à l'angle (V, OX) et à la température des ions Ti, (signaux IAP) sont totalement absentes sur leurs séries temporelles. La même remarque est attribuée aux exposants spectraux des signaux relatifs aux potentiels Vp et Vf (signaux ISL) retracés par la figure 11.

Dans le détail, ces transitions de phase d'un régime persistant vers un régime anti-persistant, montrent que juste avant le déclenchement du précurseur les exposants des signaux NO+ et l'angle (V, OX) affichent des valeurs $\beta(t) > 2$, indiquant une forte corrélation entre les données contenues dans ces deux séries. Les signaux de faibles régularités tels que NH+, NHe+, Ti et Vz sont rapportés en figure 11, par leurs exposants spectraux correspondants avec des valeurs $\beta(t) < 2$ qui révèlent une faible corrélation, sauf pour le potentiel flottant Vf marqué par $\beta(t) = 2{,}41$.

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Pendant les périodes d'activité séismique intense, l'état normal de l'ionosphère est perturbé par le déséquilibre de plusieurs constituants du plasma local. Ce déséquilibre est induit par le couplage dynamique entre la Terre Solide et son atmosphère provoqué par le déplacement des ondes acoustiques (Tanzanie) ou gravito acoustique (Japon). L'approche multiéchelle des processus physico chimiques mis en jeu au niveau de l'ionosphère procure un cadre d'analyse très satisfaisant pour mieux décrire la fractalité des signaux enregistrés par les sondes IAP-ISL**.** Les résultats significatifs obtenus par notre démarche montrent que l'utilisation d'ondelettes analysatrices, capables de « filtrer » les tendances régulières permet de quantifier et de détecter les propriétés d'invariance d'échelle des composantes stochastiques des séries temporelles. L'aspect important de la composante stochastique vient du fait qu'elle peut décrire soit une persistance, soit un état aléatoire soit une anti-persistance, dans les données par l'estimation d'exposants de loi d'échelle. Dans le cas du précurseur de Honshu, une partie des signaux qui caractérisent la population du plasma tels que NHe+, NO+, Ti ainsi que l'angle (V, OX) exhibent des valeurs de l'exposant spectral $\beta(t) > 2$. Ces valeurs suggèrent que les propriétés d'invariance d'échelles présentes dans les perturbations séismo-ionosphériques sont associées à des corrélations à longue portée. Soulignons aussi que notre indice de régularité a fourni une localisation temporelle de ce précurseur avant son déclenchement par quelques secondes par rapport aux moments publiés par le catalogue séismique de DEMETER.

Ces résultats sont globalement retrouvés dans l'analyse des signaux représentant le précurseur d'Arusha, avec néanmoins des valeurs de l'exposant $\beta(t)$ plus faibles, comme pour le cas de NHe+. On peut attribuer ce changement de propriétés à l'influence déterminante d'une plus faible magnitude, égale à 5 par rapport à celle du précurseur de Honshu atteignant 7, et donc une plus faible variabilité dans les données. Néanmoins, dans les deux exemples traités, les exposants spectraux correspondants aux mesures ISL montrent un comportement anti-persistant. Ces observations permettent de confirmer que le mécanisme physique qui contrôle les fluctuations est associé à chaque type de mesure.

L'ensemble de ces résultats semble alors conforter l'hypothèse guidant notre approche, en amenant à marquer une distinction théorique forte entre deux niveaux de comportement des signaux séismo-ionosphériques. Si l'amplitude des fluctuations des signaux permet de décrire le comportement d'un paramètre physique ou chimique, le niveau de régularité locale ou de fractalité, affecté de manière conjointe par les spécificités de l'outil de mesure et certaines caractéristiques propres du milieu, se présente comme un indicateur pertinent des propriétés d'invariance d'échelle. L'amplitude des fluctuations serait le reflet observable de la congruence entre le milieu et le paramètre physique mesuré. L'exposant spectral apparaît comme un estimateur des propriétés d'invariance d'échelle du milieu en fonction des contraintes physiques caractérisant chaque mesure.

6. CONCLUSION

Le but principal de cette étude est l'analyse multiéchelle des différentes perturbations pré et post-séismiques provoqués par des séismes. Nous avons exploités les données de DEMETER de type IAP, ISL dans des intervalles temporels pré co-séismiques et post séismique enregistrées au-dessus de la zone de subduction de Honshu au Japon et au-dessus du séisme volcanique de la Tanzanie (Arusha). L'analyse spectrale par TF confirme la pertinence d'un modèle fractal en lien avec les processus physico chimiques sous jacents décrits par des phénomènes de diffusion.

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 suggèrent 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.

Tableau 1. Perturbations ionosphériques enregistrées le long de la demi-orbite 838 down passant au-dessus du japon le 29 août 2004. Par analogie avec le catalogue de DEMETER, on attribue le rouge aux évènements pré-séismiques (TP) et le vert aux événements post-séismiques (TR). Pour les groupes de séismes (NPR), on représente les coordonnées du centre de chaque concentration.
Ionospheric disturbances recorded along the down half-orbit from 838 over Japan August 29, 2004. As in the catalog Demeter, the red is attributed to pre-seismic events (TP) and green events post-seismic (TR). For groups of earthquakes (NPR), we represent the center coordinates of each concentration.

ID	Année	Mois	jour	Temps TU	Latitude	Longitude	Distance satellite épicentre (km)	Magnitude	Période du séisme	Région
TP1	2004	08	29	01:35:54	33.08	136.21	726.81	7	5—30J	Près de la côte sud de l'Ouest de Honshu, Japon
TP2	2004	08	29	01:32:15	47.432	139.92	1250	6	1-5J	/
TP3	2004	08	29	01:28:00	59,99	143,63	1800	5	>30J	/
TP4	2004	08	29	01:30:20	53,17	141,62	1380	5	6—24h	/
TR1	2004	08	29	01:29:30	57,12	142,68	1400	5	1-5J	/
TR2	2004	08	29	01:31:15	50,12	139,92	1125	6	5-30J	/
NPR1	2004	08	29	01:33:00 01:35:00	40,26	136,74	/	5 ET 6	/	/
NPR2	2004	08	29	01:37:00 01:42:00	20,52	131,97	/	5 ET 6	/	/
NPR3	2004	08	29	01:42:45 01:46:30	38,46	129,36	/	5 ET 6	/	/
NPR4	2004	08	29	01:47:00 01:51:00	-13,63	124,59	/	5 ET 6	/	/

Remerciements

DEMETER est un satellite du CNES et les participants de ce projet sont profondément remerciés. Les auteurs remercient aussi les principaux responsables des expériences IAP et ISL (J.J. Berthelier et J.P. Lebreton) pour la mise à disposition de leurs données.

Références

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

Enescu, B., Ito, K. and Struzik, Z. R. (2006). Wavelet based multiscale resolution analysis of real and simulated time series of earthquakes. Geophys. J.Int., vol.164, p. 63-74.

Flandrin, P. (1998). Temps fréquence. 2e édition revue et corrigée, HERMES, Paris, 596 p.

Gilden, D., Thornton, T., and Mallon, M. (1995). 1/f noise in human cognition. Science, vol. 267, p. 1837–1839.

Grossmann, A. and Morlet, J. (1984). Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM J. Math. Anal.*, vol. 15, p. 723-736.

Gouyet, J. F. (1992). Physique et structures fractals, Masson, Paris, 232 p.

Holschneider, M. (1995).Wavelet an analysis tool. Clarendon Press, Oxford England, 423 p.

Kiyono, K., Struzik, Z. R., and Yamamoto, Y. (2006). Criticality and Phase Transition in Stock-Price Fluctuations. Phys. Rev. Lett., vol. 96, doi:10.1103 /Phys Rev Lett. 96.068701.

Lebreton, J. P., Stverak, S., Travnicek P., Maksimovic, M., Klinge, D., Merikallio, S., Lagoutte, D., Poirier, B.,Kozacek, Z. and Salaquarda, M. (2006). The ISL Langmuir Probe experiment and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results, Planet Space Science, vol.54, p. 472–486.

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, 176 p.

Malamud, B., Morein, G., and Turcotte, D. (1998). Forest fires: an example of self-organized critical behavior, Science, 281, 1840–1842

Mandelbrot, B.B. and Ness, J. W. (1968)**.** Fractional Brownian motions, fractional noises and applications, SIAM Rev.*,* vol. 10, p. 422-437

Mandelbrot, B. (2005). Fractals and Scaling in Finance. Springer, New York, 551 p.

Mallat, S. (2000). Une exploration des signaux en ondelettes. Edition de l'Ecole Polytechnique, 636 p.

Parrot, M. (2006). Preface-special issue of Planetary and Space Science DEMETER. Planetary and Space Science, vol. 54, p. 411–412

Parrot, M., Benoist, D., Berthelierc, J.J., Bleckid J., Chapuis, Y., Colin, F., Elie, F., Fergeaua, P., Lagoutte, D., Lefeuvre, F., Legendre, C., Lévêque, M., Pincon, J.L., Poirier, B., Seran, H-C. and Zamora, P. (2006). The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results. Planetary and Space Science, vol. 54, p. 441–455

Peng, C., Havlin S., Stanley, H.and Goldberger, A. (1995). Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. Chaos, vol. 5, p. 82–87.

Wanliss, J. A. and Dobias, P. (2007). Space Storm as a Dynamic Phase Transition. J. Atmosph. Solar-Ter. Phys., vol. 69, p. 675–684.

Zaourar, N., Hamoudi, M. et Briqueu, L. (2006a). Détection des transitions lithologiques de la composante fractale des diagraphies par Transformée en Odelettes Continue. C. R. Acad. Sc., Paris, vol. 338, no 8, p. 514-520.

Zaourar, N., Briqueu, L., Gaci, S., Hamoudi, M. and Gibert D. (2006b). Sonic Log Analysis with the Continuous Wavelet Transform. Bulletin du Service Géologique National, vol. 17, no 2**,** p. 161-181.

Zaourar, N., Mebari, R., Briqueu, L., Mandea, M., and Hamoudi, M. (2008). Wavelet analysis applied to InterMagnet data: Singularity detections related to geomagnetic storms. The Journal of National Research Institute of Astronomy & Geophysics, ser., "B". (sous presse).

Zaourar, N., Mebari, R., Hamoudi, M., Briqueu, L., et Parrot, M. (2009). Analyse fractale des fluctuations seismo – ionosphériques. Troisième Journées d'Animation Scientifique du Réseau de Télédétection (JAS'09) de l'AUF, 8-11 novembre, 6 p. Université des Sciences et de la Technologies Houari Boumediene, Alger, Algérie