

## Observations de Perturbations Ionosphériques Itinérantes à Moyenne Echelle au moyen des mesures de Contenu Electronique Total par un réseau dense de récepteurs GPS et des mesures plasma de DEMETER.

### Simultaneous observations of Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances using TEC measurements from a dense GPS receiver network and plasma measurements by DEMETER.

---

*Tatsuo ONISHI\**, *Takuya TSUGAWA\*\**, *Yuichi OTSUKA\*\*\** and *Jean-Jacques BERTHELIER\**

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

\*\* National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Japan.

\*\*\* Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan.

Mots Clés: Ionosphère, Perturbations ionosphériques itinérantes, Contenu Electronique Total, DEMETER

Key words: Ionosphere, Travelling ionospheric disturbances, Total Electron Content, DEMETER

---

#### Résumé

Nous présentons un ensemble d'observations simultanées des perturbations ionosphériques itinérantes à moyenne échelle de jour au-dessus de la région de l'Amérique du Nord en utilisant des mesures du Contenu Electronique Total (CET) sous la forme de cartes géographiques de la région et de mesures plasma effectuées par DEMETER dans l'ionosphère supérieure à une altitude de 650 km. Les mesures de CET ont été fournies par le réseau dense de récepteurs GPS et les mesures du plasma sont celles obtenues par l'analyseur ionique IAP de DEMETER. La comparaison de ces deux types de données montre une bonne corrélation entre la variation spatiale du CET, qui correspond aux perturbations de l'ionosphère, caractéristiques des MSTID au voisinage de la région du maximum de densité électronique vers 300 kilomètres d'altitude, et la variation des paramètres plasma observées in-situ par le satellite dans l'ionosphère supérieure. Nous avons également obtenu la première mesure des variations de la vitesse du plasma le long du champ magnétique associée à une MSTID.

We present simultaneous observations of daytime medium-scale travelling ionospheric disturbances (MSTIDs) over the North America, using measurements of the Total Electron Contents (TEC) and ionospheric plasma data from the DEMETER micro-satellite in the upper ionosphere at the altitude of 650km. The TEC data is obtained from the dense US network of the GPS receivers and the plasma data are obtained from the plasma analyzer on board DEMETER. The data comparison shows a good correlation between the spatial variation of TEC, corresponding to ionospheric perturbations which are characteristic of MSTID in the vicinity of the region of peak electron density near 300km of altitude, and the variation of plasma parameters observed in-situ by the satellite in the topside ionosphere. In addition, we have obtained the first measurement of the variations of the plasma velocity parallel to the magnetic field within a MSTID.

---

#### Introduction

Au cours des 50 dernières années, le développement des sondages de l'ionosphère inférieure à partir du sol a permis d'établir une classification des perturbations ionosphériques itinérantes, principalement suivant leur longueur d'onde, leur période et les phénomènes qui leur donnent naissance. Le travail novateur de Hines [1] a suscité un grand nombre d'études théoriques et expérimentales au cours des 30 dernières années visant à comprendre la chaîne complexe des processus physiques qui interviennent au cours du développement et de la propagation de ces perturbations.

Les perturbations ionosphériques itinérantes à moyenne échelle (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances, MSTID, nous conserverons cette notation anglaise) se manifestent sous la forme de variations périodiques du plasma avec une longueur d'onde typique de quelques centaines de kilomètres et une période de 15 à 60 minutes environ. Les MSTID de jour ont pour origine les ondes de gravité atmosphériques (OGA) générées la plupart du temps à haute latitude et qui se propagent vers l'équateur (voir une revue dans [2]).

Les perturbations ionosphériques itinérantes à grande échelle (Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances, LSTIDs) sont associées à l'activité aurorale et se propagent à de grandes vitesses de plusieurs centaines m/s avec des longueurs d'onde plus importantes (~1000km) et des périodes comprises entre 0.5 et 3.0 heures. Les LSTID ont pour origine les ondes de gravité engendrées dans la thermosphère par l'énergie dissipée par les électrons précipités et/ou les électrojets auroraux. Ces ondes de gravité et les LSTID auxquelles elles donnent naissance dans l'ionosphère intéressent des régions très étendues en longitude, de plusieurs milliers de kilomètres en général.

Depuis le milieu des années 90, des cartes bidimensionnelles du CET à haute résolution sont disponibles au-dessus du Japon et de l'Amérique du Nord, où des réseaux denses de récepteurs GPS sont installés et fournissent des données continues (par exemple [3] et références). Ces cartes constituent un outil unique pour observer et caractériser la structure et de l'évolution spatiales des MSTIDs.

Il y a très peu d'observations in-situ par satellite de MSTIDs dans l'ionosphère. Utilisant des données obtenues par le satellite Dynamic Explorer 2, Johnson et al. [4] ont présenté des observations de variation quasi-sinusoïdale de la vitesse verticale des ions et des neutres au-dessus des calottes polaires. Une observation d'une MSTID de nuit à partir des données de DMSP F15 et des mesures des émissions lumineuses de la haute atmosphère effectuées à partir du sol a été présentée par Shiokawa et al. [5]. Des variations quasi-périodiques des paramètres du plasma aux latitudes sub-aurorales ont été également mises en évidence sur DEMETER et il a été suggéré que ces variations étaient associées à des TID générées par des OGA [6]. Cette présentation concerne les premières observations simultanées de MSTID de jour au-dessus de l'Amérique du Nord, utilisant des paramètres du plasma obtenus par GPS-TEC et le micro-satellite DEMETER.

Dans le premier paragraphe on décrit brièvement les données de CET obtenus par les réseaux GPS et les mesures plasma fournies par DEMETER. Le deuxième paragraphe présente quelques événements pour lesquels une comparaison entre les deux ensembles de données a été possible. Dans la dernière partie, nous discutons plus en détail les résultats obtenus pour un de ces événements dans le cadre d'un modèle simple de la propagation du MSTID dans la région F.

## 1. Présentation des données utilisées.

Les données CET obtenues à partir du réseau de récepteur de GPS en Amérique du Nord ont été choisies pour cette étude parce qu'elles offrent une couverture dense au-dessus de régions très étendues, ce qui permet au moins une comparaison avec des données satellites par jour. Depuis janvier 2008, plus de 1700 récepteurs sont disponibles, fournissant les valeurs du CET oblique toutes les 30 secondes à partir de 5~8 satellites GPS visibles et avec des angles d'élévation > 30°. Dans la reconstitution des cartes de CET vertical, nous avons utilisé la méthode de Tsugawa, et al. [3]. Les ambiguïtés de nombre entier de cycles et les biais instrumentaux de chaque paire de données récepteur-satellite sont supprimés, en soustrayant à partir des données une moyenne glissante de 60 minutes, qui est plus longue qu'une périodicité typique de MSTID (10~60 minutes) [7]. La valeur du CET vertical, appelée simplement CET dans la suite, est alors obtenue en multipliant le CET oblique par un facteur défini par le rapport entre « l'épaisseur ionosphérique » prise égale à 200 kilomètres et la longueur du trajet des ondes GPS le long de la ligne de visée (LDV). La position associée à chaque mesure CET est définie par le point à l'altitude de 300 kilomètres sur la LDV. Ces hypothèses simplificatrices sont utilisées habituellement, parce que la région F de l'ionosphère, qui fournit la contribution principale au CET, présente un maximum de densité électronique à une altitude moyenne de 300 kilomètres et a une épaisseur typique d'environ 200 kilomètres (pour plus de détails sur la détermination du CET, voir par exemple [8]). Les valeurs du CET sont en suite discrétisées et moyennées sur des cellules de 0.5 x 0.5 degrés en latitude et longitude. On calcule ensuite une carte des variations  $\Delta$ TEC du CET en calculant et en supprimant la moyennes glissante calculée sur 60 minutes avec une résolution spatiale de 1.5° x 1.5° en lissant sur 3 x 3 cellules et avec une résolution temporelle de 10 minutes (moyenne de 20 valeurs espacées de 30s). Un exemple des cartes de  $\Delta$ TEC est montré dans le panneau supérieur de la Figure 1.

DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) est le premier micro-satellite de la filière MYRIADE du CNES. Depuis Décembre 2006, son orbite est quasi héliosynchrone et quasi circulaire à 650 kilomètres d'altitude avec un noeud descendant à 10:30 TL sur la partie de jour des orbites. L'instrument Analyseur Plasma (IAP) se sert de deux analyseurs, l'Analyseur à Potentiel Retardateur (APR) pour effectuer l'analyse en énergie, l'Analyseur de Direction de Vitesse (ADV) pour déterminer la direction de l'arrivée des ions [6]. En combinant ces 2 mesures on obtient la densité des ions, la température et la composante  $V_{\parallel}$  de la vitesse des ions parallèle au champ magnétique, comptée positivement vers le haut. Les données de la densité d'électrons obtenue par l'instrument Sonde Langmuir (ISL) [9] ont été

également utilisées dans l'étude du cas présenté dans la dernière partie. On a effectué sur les données satellite le même traitement que sur le CET pour mettre en évidence les variations des paramètres du plasma ce qui permet de filtrer la composante quasi-continue et les fluctuations rapides dus aux irrégularités ionosphériques à petite échelle et/ou aux bruits instrumentaux.

## 2. Observations

Dans les panneaux supérieurs (a) à (c) de la Figure 1, on a montré 3 cartes de  $\Delta\text{TEC}$  obtenues pendant un intervalle de temps de 40 minutes, entre 17:10:00 UT à 17:50:00 UT avec une résolution de 20 minutes. Cet intervalle de temps correspond au passage de DEMETER au-dessus de la région centrale des Etats-Unis le 22 janvier 2008 dans la partie de jour de l'orbite 19011 (désignée ci-après 19011\_0). Au dessus de l'Ouest et du Centre des Etats-Unis dans un secteur de longitude  $[-120^\circ, -90^\circ]$  et de latitude  $[36^\circ\text{N}, 44^\circ\text{N}]$ , on peut identifier des bandes de  $\Delta\text{TEC}$  alternativement augmenté et diminué correspondant à une MSTID dont le front est sensiblement Est-Ouest sur une longueur de  $\sim 400$  km et qui se propage vers l'équateur avec une vitesse de propagation de  $\sim 100\text{m/sec}$ .

Le panneau (b) à 17:30:00 (UT) correspond au temps moyen où le satellite survole la région d'intérêt, entre la frontière nord des USA à 17:28:00 UT et la limite sud de la région couverte par le réseau GPS à 17:36:00 UT, ce qui correspond à un intervalle de latitude de  $\sim 48^\circ\text{N}$  à  $\sim 28^\circ\text{N}$ . Pour faciliter la comparaison avec la carte de  $\Delta\text{TEC}$ , les positions de DEMETER indiquées dans le panneau (b) sont celles des points à 300km d'altitude sur la ligne de force magnétique qui passe par le satellite. Les mesures de  $V_{i||}$  étant sujettes à des fluctuations de petite échelle, nous avons lissé les données sur une longueur équivalente à 2 degrés de latitude et soustrait les moyennes glissantes calculées sur 10 degrés de latitude, ce qui fournit les valeurs des variations  $\Delta V_{i||}$  de la vitesse  $V_{i||}$  codées en couleur sur le panneau (b). On constate une excellente correspondance entre les courbes de  $\Delta V_{i||}$  et celles de  $\Delta\text{TEC}$  avec une différence de phase entre les 2 paramètres correspondant à un décalage en latitude de leurs extrema avec 3 pics à  $46^\circ\text{N}$ ,  $39^\circ\text{N}$  et  $34^\circ\text{N}$  et à  $47^\circ\text{N}$ ,  $42^\circ\text{N}$  et  $36.5^\circ\text{N}$  respectivement pour  $\Delta V_{i||}$  et  $\Delta\text{TEC}$ .

Dans la Figure 2, plusieurs autres cas d'observations simultanées de MSTID par le réseau de GPS et DEMETER sont présentés de la même façon que sur la Figure 1. Tous les cas montrent une bonne corrélation de  $\Delta V_{i||}$  dans l'ionosphère supérieure avec les structures de MSTID dans l'ionosphère au voisinage du maximum de la région F.

Les courbes tracées au dessous des cartes couleur représentent les variations, le long de l'orbite de DEMETER, de  $\Delta N_e$  et  $\Delta V_{i||}$  mesurées par DEMETER et de  $\Delta\text{TEC}$  mesuré au sol. On ramène à l'altitude du satellite les valeurs de  $\Delta\text{TEC}$  en suivant la ligne de force magnétique à partir de 300 km de façon que les variations présentées sur les courbes correspondent à ce qui est observé sur une même ligne de force magnétique. Pour filtrer les fluctuations de  $\Delta\text{TEC}$  on a calculé la moyenne glissante de ce paramètre sur 5 minutes. La vitesse satellite (7.5 km/sec) est beaucoup plus rapide que la vitesse de propagation de MSTID (100m/sec). Par conséquent, les observations par satellite fournissent, à l'heure du passage du satellite, une image presque instantanée de l'ionosphère supérieure au-dessus du secteur où se situe la MSTID. Quand l'angle entre la vitesse du satellite et la direction horizontale de propagation de la MSTID, perpendiculaire au front d'onde, est grand, la longueur d'onde apparente du MSTID sur des données satellites peut être plus grande que sa valeur réelle. Pour les divers cas étudiés, l'amplitude de variation de  $\Delta V_{i||}$  est de  $\sim 5$  à  $50$  m/sec pour une amplitude de  $\Delta\text{TEC} = 0.1$  TECU. On remarque que l'amplitude de  $\Delta V_{i||}$  devient plus petite, quand la MSTID se propage dans une direction plus inclinée par rapport au plan géomagnétique (la Figure 3). Pour des directions de propagation plus inclinées par rapport au plan géomagnétique, la composante le long du champ magnétique de la vitesse des neutres dans l'onde de gravité est plus petite.  $V_{i||}$  résulte du transfert de quantité de mouvement, par les collisions neutres-ions, des neutres vers les ions parallèlement au champ magnétique, ce qui permet d'expliquer cette observation.

Le cas de l'orbite 19011\_0 représenté sur le panneau inférieur de la Figure 1 est intéressant parce que les fluctuations  $\Delta N_e$  de la densité électronique font apparaître clairement des variations périodiques de la densité électronique  $N_e$  qui ne sont pas masquées par un niveau trop important d'irrégularités. On voit très bien l'excellente cohérence entre les variations périodiques de  $\Delta N_e$ ,  $\Delta\text{TEC}$  et  $\Delta V_{i||}$  avec, pour  $\Delta N_e$  des maxima locaux identifiés à  $45^\circ\text{N}$ ,  $38^\circ\text{N}$  et  $32^\circ\text{N}$ . Les observations peuvent être résumées comme suit :

(a)  $\Delta\text{TEC}$  et  $\Delta N_e$ . Avec les hypothèses simplificatrices mentionnées ci-dessus,  $\Delta\text{TEC}$  et  $\Delta N_e$  représentent les variations de la densité électronique à deux altitudes différentes, 300 km (maximum de la région F) et 650 km (altitude de DEMETER). Les maxima de  $\Delta N_e$  sont décalés vers l'équateur par rapport aux maxima de  $\Delta\text{TEC}$ . Le décalage en latitude devient plus grand quand la latitude diminue,  $\sim 3$  degrés vers une latitude de  $42^\circ\text{N}$  et  $\sim 5^\circ$  vers une latitude de  $35^\circ\text{N}$ .

(b)  $\Delta V_{||}$  et  $\Delta Ne$ . Les maxima de  $\Delta V_{||}$  (à 34°N, 39°N et 45.5°N) se correspondent à une région où la variation  $\Delta Ne$  augmente après un minimum (à 32°N, 38°N et 45°N) vers l'équateur, ce qui implique que la différence de phase est dans la gamme de 0° à 180°. Cette différence de phase devient également plus grande aux latitudes inférieures.

### 3. Discussion et Conclusion.

Puisque la densité ionique dans la région F supérieure est beaucoup plus petite que la densité neutre, les ions peuvent être considérés comme des traceurs passifs des perturbations de l'atmosphère neutre car ils se déplacent le long des lignes de champ magnétique avec une vitesse égale à la composante de la vitesse des neutres parallèle au champ magnétique. Dans [10], Hooke a analysé les variations temporelles et spatiales de la densité et de la vitesse des ions dans des Perturbations Ionosphériques Itinérantes (TIDs en anglais) dans la gamme d'altitude où l'ion et les neutres sont effectivement couplés par des collisions. Pour des valeurs typiques des paramètres de l'atmosphère neutre et de l'ionosphère, la frontière entre les zones collisionnelle et non-collisionnelle se situe à environ 450 kilomètres, c'est-à-dire entre 300km, altitude considérée comme représentative du CET et 650 km altitude de DEMETER sur l'orbite 19011\_0. Hooke a employé une approximation d'onde plane pour l'OGA et un modèle simple basé sur l'équation de continuité pour décrire les perturbations ionosphériques. Ce modèle montre que dans cette gamme d'altitude, les perturbations de la densité électronique  $\Delta Ne$  sont organisées le long des fronts de phase, qui reproduisent les fronts de phase des perturbations de la densité du gaz neutre et se déplacent à la même vitesse que l'OGA. Les variations de  $\Delta V_{||}$  sont organisées dans une configuration similaire avec un décalage des fronts de phase correspondant à une différence de phase,  $\Delta\Phi$ , fonction de la composante du vecteur de propagation de l'onde de gravité le long du champ magnétique, du taux d'atténuation de l'onde dans la direction verticale et de l'échelle de hauteur locale du plasma. Ainsi, la différence de phase  $\Delta\Phi$  entre la vitesse  $V_{||}$  et  $\Delta Ne$  varie avec l'altitude.

Dans l'ionosphère supérieure, au-dessus de ~ 450 km d'altitude, les collisions neutre-ions deviennent négligeables et la propagation des perturbations du plasma est régie par les termes de transport et de diffusion le long des lignes de force du champ magnétique. Pour estimer les caractéristiques de la propagation des perturbations du plasma dans cette tranche d'altitude, nous nous sommes inspirés des résultats de [11] concernant la propagation des perturbations ionosphériques engendrées par l'onde acoustique associée à un séisme au voisinage de l'épicentre. Les auteurs ont montré qu'au-dessus de la région collisionnelle, les perturbations du plasma se propagent le long du champ magnétique à la vitesse des ondes acoustiques ioniques (de l'ordre de 1 à 2 km/s) sans variation significative de la différence de phase entre  $\Delta Ne$  et  $\Delta V_{||}$ . Comme le temps de propagation le long du champ magnétique entre 450 et 650 km est de l'ordre de ~ 100 à 200 s, négligeable par rapport à la période de la MSTID qui est au moins d'un ordre de grandeur supérieur, on peut en pratique négliger ce retard lorsque l'on compare  $\Delta Ne$  et  $\Delta TEC$ . Sur la Figure 4, nous avons donné une interprétation schématique de nos observations, dans un cas simple où l'OGA et la MSTID associée se propagent dans un plan géomagnétique et en considérant deux régions séparées par frontière collisionnelle/non-collisionnelle aux environs de 450 kilomètres d'altitude. A haute altitude, les OGA deviennent évanescents et, en raison de la viscosité atmosphérique plus élevée [12], les perturbations de l'atmosphère neutre sont organisées le long de la direction verticale. A basse altitude, la vitesse du gaz neutre, représentée par des flèches sur la Figure 4, oscille dans la direction parallèle au champ magnétique. Dans le régime collisionnel étudié par Hooke, les oscillations de  $\Delta V_{||}$  coïncident avec les oscillations de la vitesse du gaz neutre imposées par l'OGA. Les variations de  $\Delta Ne$  sont organisées selon une structure semblable avec une différence de phase  $\Delta\Phi$  entre  $\Delta Ne$  et  $\Delta V_{||}$  comme représenté sur la Figure 4 où  $\Delta\Phi$  a été choisi conformément aux observations de DEMETER dans la demi-orbite 19011\_0. Selon [10],  $\Delta\Phi$  varie avec l'altitude, donc  $\Delta\Phi_A \neq \Delta\Phi_B$ . Dans la zone collisionnelle, le maximum de  $\Delta V_{||}$  est en retard par rapport au maximum de  $\Delta Ne$  et se produit ainsi à une latitude plus élevée. Au-dessus de la frontière collisionnelle,  $\Delta Ne$  et  $\Delta V_{||}$  se propagent le long des lignes de champ magnétique jusqu'à l'altitude du DEMETER en conservant la même différence de phase  $\Delta\Phi_B \approx \Delta\Phi_C$ . Puisque DEMETER se dirige vers l'équateur, il observe le  $\Delta V_{||}$  maximum avant le maximum de  $\Delta Ne$  c.-à-d. à une latitude plus élevée. En raison de l'inclinaison respective du front de phase de l'OGA et du champ magnétique, DEMETER coupe la ligne de force du champ magnétique sur laquelle se situe le maximum de  $\Delta TEC$  (supposé pour correspondre au maximum de  $\Delta Ne$  à 300 kilomètres) à une latitude plus élevée que les maxima de  $\Delta Ne$  et  $\Delta V_{||}$  observés le long de l'orbite.

Comme indiqué dans la Figure 1, les différences de phase entre les maxima des trois paramètres  $\Delta TEC$ ,  $\Delta Ne$  et  $\Delta V_{||}$  augmente le long du parcours de la MSTID vers l'équateur. Il semble que ce soit la première fois qu'une telle observation ait été présentée et ceci peut fournir une information fructueuse sur le mécanisme de propagation des OGA sur un grand intervalle de latitude. Une analyse détaillée de cet effet sort des limites du présent travail, mais une idée simple peut être suggérée fondée sur une inclinaison croissante du vecteur de

propagation par rapport à l'horizontal le long du parcours de l'OGA. Ceci induirait simultanément une plus grande différence de phase entre les maxima de  $\Delta\text{TEC}$  et de  $\Delta N_e$  et entre les maxima de  $\Delta N_e$  et de  $\Delta V$ . Cependant la réalité est certainement beaucoup plus complexe et l'interprétation détaillée des observations exige une analyse plus complète et un effort de modélisation actuellement en cours.

### Références bibliographiques

1. Hines, C.O., 1960, Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, *Can. J. Phys.*, 38, 1441-1481
2. Hocke, K., and K. Schlegel (1996), A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982– 1995, *Ann. Geophys.*, 14, 915–917, 940.
3. Tsugawa, T., Y. Otsuka, A.J. Coster, and A. Saito (2007), Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22101, doi:10.1029/2007GL031663.
4. Johnson, F.S., W.B. Hanson, R.R. Hodges, W.R. Coley, G.R. Carignan and N.W. Spencer (1995). Gravity waves near 300km over the polar cap. *J. Geophys. Res.* 100, 23,993.
5. Shiokawa, K., Y. Otsuka, C. Ihara and T. Ogawa (2003), Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude, *J. Geophys. Res.*, 108(A4), 1145, doi:10.1029/2002JA009639.
6. Berthelier, J.J., M. Godefroy, F. Leblanc, E. Séran, D. Peschard, P. Gilbert and J. Artru (2006), IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER, *Planet. Space Sci.* 54, 487-501.
7. Hunsucker, R. (1982), Atmospheric gravity waves generated in the high latitude ionosphere: A review, *Rev. Geophys.*, 20, 293–315.
8. Mannucci, A.J., B.A. Iijima, U.J. Lindqwister, X. Pi, L. Sparks, and B.D. Wilson (1999), GPS and ionosphere, in *Review of Radio Science 1996-1999*, edited by W. R. Stone, pp. 625-665, URSI, Ghent, Belgium.
9. Lebreton, J.P., S. Stverak, P. Travnicek, M. Maksimovic, D. Klinge, S. Merikallio, D. Lagoutte, B. Poirier, Z. Kozacek and M. Salasquarda (2006), The ISL Langmuir Probe experiment and its data processing onboard DEMETER: scientific objectives, description and first results, *Planet. Space Sci.*, 54, 5, 472-486.
10. Hooke, W.H. (1968), Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30, 795–823.
11. Marchand, R. and J.-J. Berthelier (2008), Simple model for post seismic ionospheric disturbances above an earthquake epicentre and along connecting magnetic field lines, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 1341-1347.
12. Pitteway, M.L.V. and C.O. Hines (1965), The reflection and ducting of atmospheric acoustic-gravity waves, *Can. J. Phys.*, 43, 2222-2243.

Figures

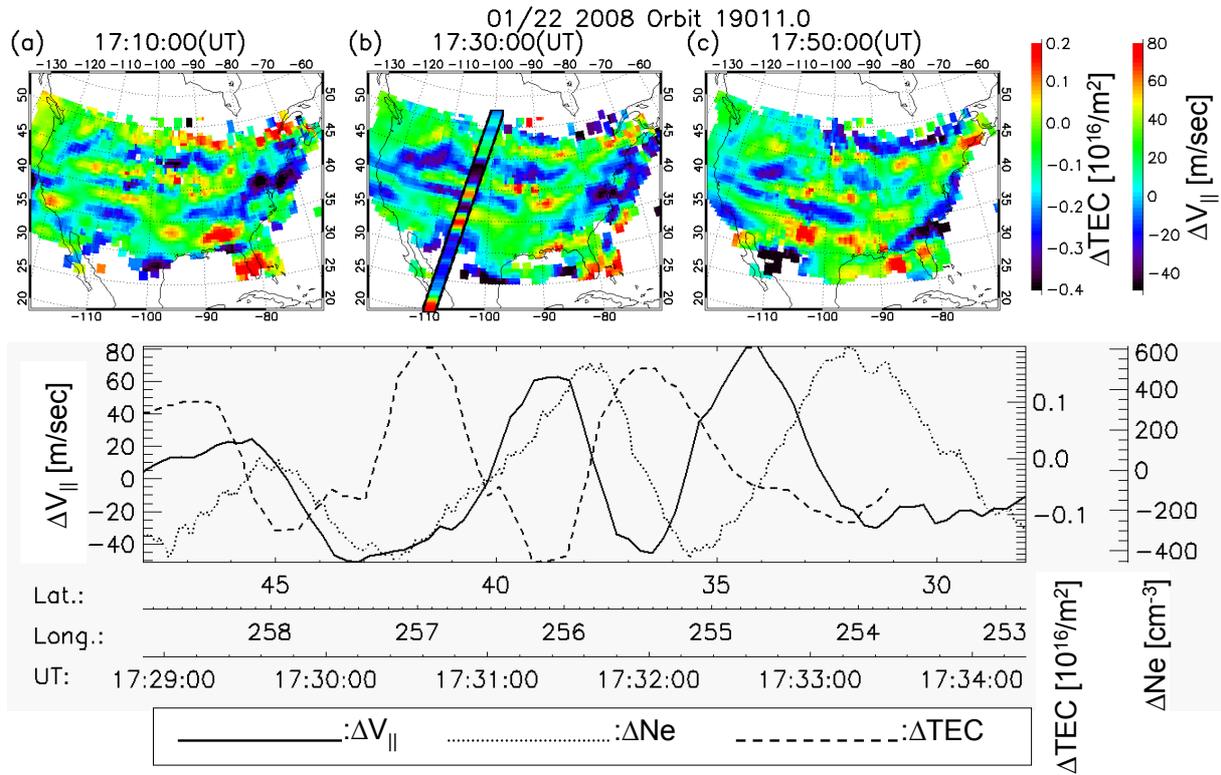


Figure 1 : Carte de GPS-TEC au-dessus des USA le 22 janvier 2008, avec la variation de  $\Delta V_{||}$  le long de la demi-orbite 19011\_0 de DEMETER (panneaux supérieurs) et les courbes représentant les variations de  $\Delta V_{||}$  (IAP),  $\Delta\text{TEC}$  et  $\Delta\text{Ne}$  (ISL) le long de la trajectoire du satellite (panneau inférieur).

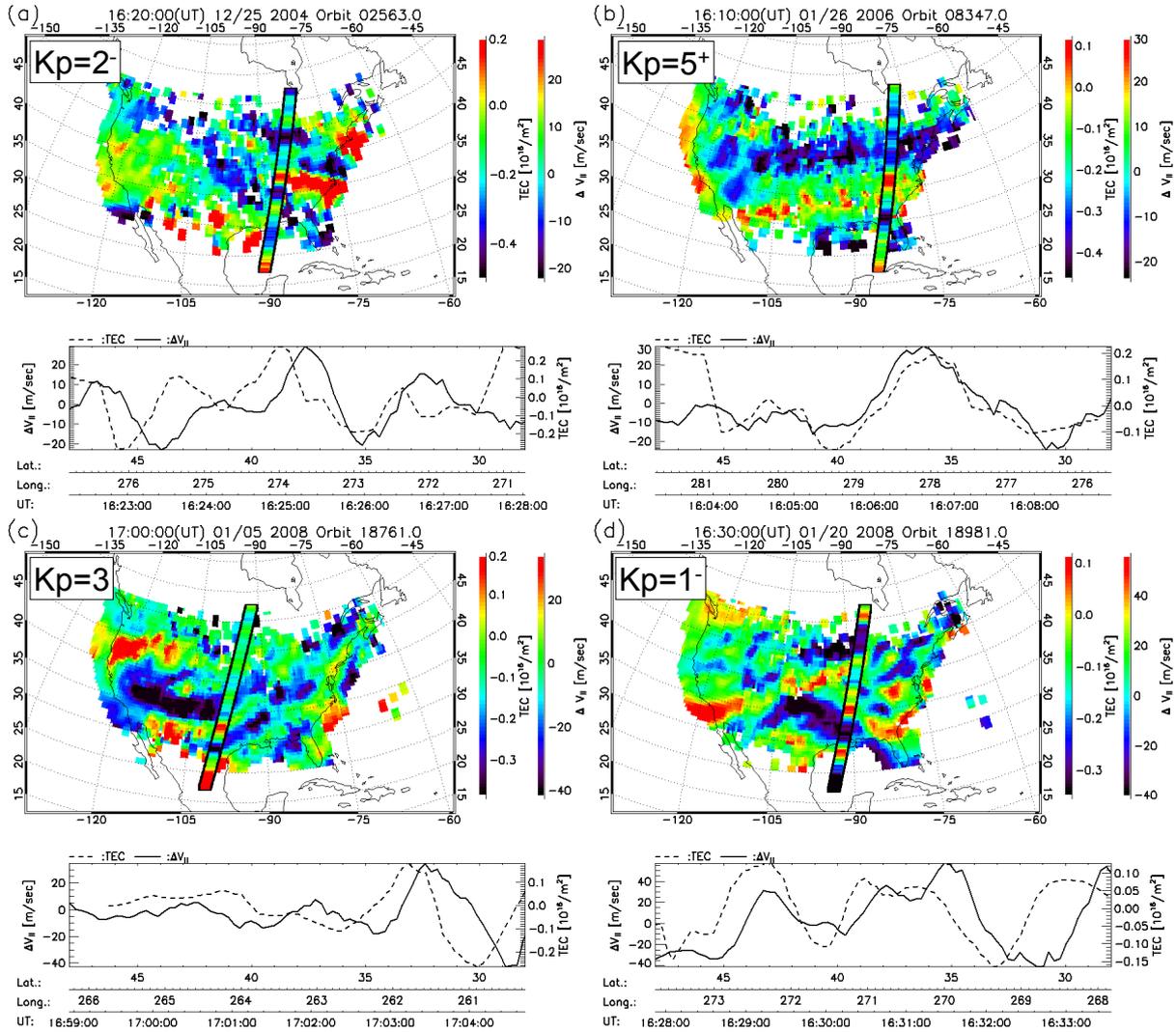


Figure 2 : Exemples d'observations de TID par les mesures GPS-TEC et IAP de DEMETER. Pour chaque cas on a représenté les mêmes cartes et tracés que sur la Figure 1, à l'exception de la densité électronique  $N_e$  qui n'est pas représentée. Dans le panneau (b), on reconnaît une LSTID associée à une activité magnétique forte. La différence de phase est négligeable entre le  $\Delta TEC$  et le  $\Delta V_{||}$  en raison de sa grande longueur d'onde. Dans les autres cas, on observe des différences de phase de quelques degrés en latitude.

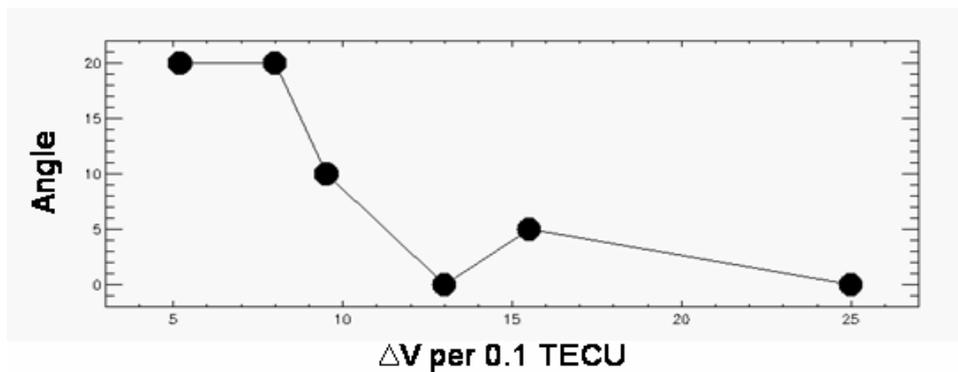


Figure 3 : relation entre la vitesse parallèle des ions  $\Delta V_{||}$  et l'angle entre la direction de propagation de la MSTID et le plan géomagnétique.

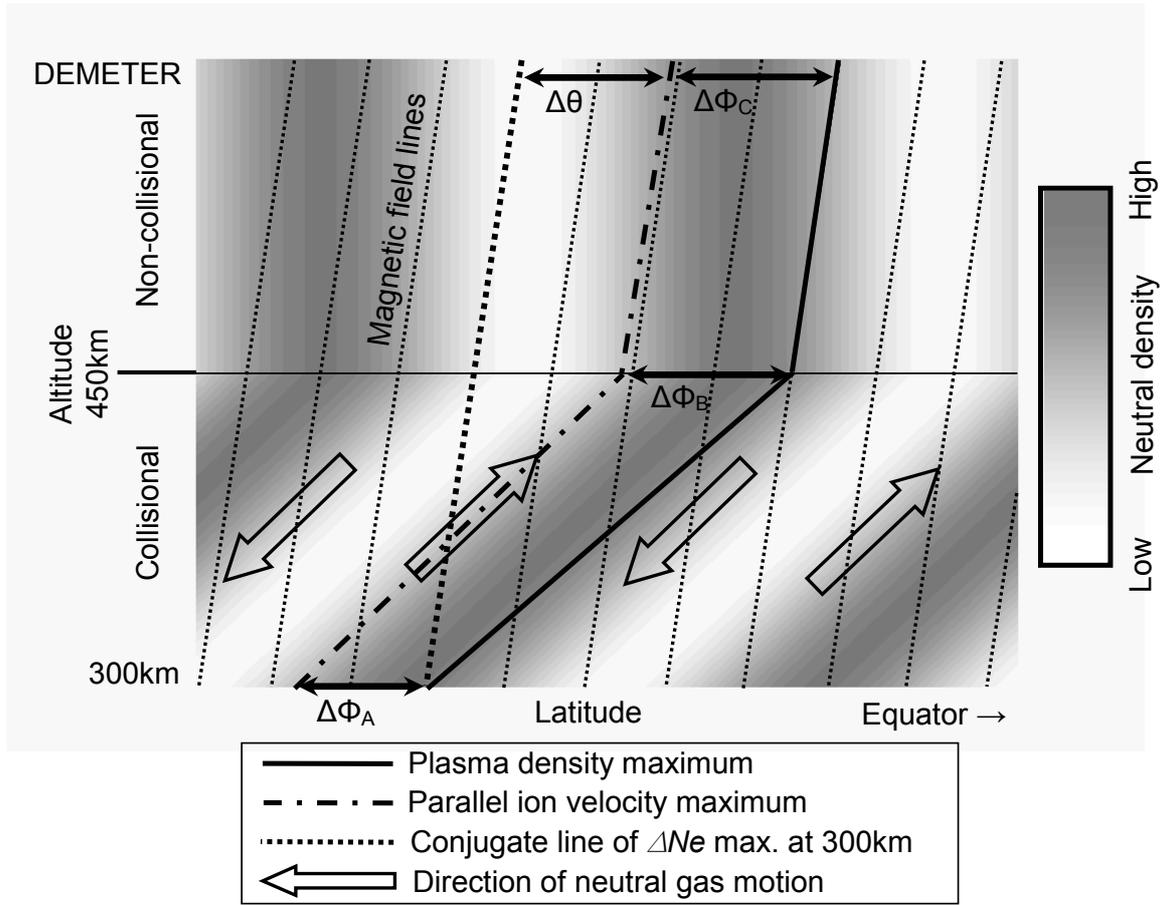


Figure 4 : Représentation schématique des structures des variations de la densité et de la vitesse du gaz neutre et du plasma induites par l'OGA/MSTID. La différence de phase,  $\Delta\Phi$ , entre le  $\Delta V_{\parallel}$  et le  $\Delta Ne$  est variable dans le régime collisionnel ( $\Delta\Phi_A \neq \Delta\Phi_B$ ), tandis que dans le régime non-collisionnel, elle est constante ( $\Delta\Phi_B = \Delta\Phi_C$ ). La différence de phase observée entre  $\Delta TEC$  et  $\Delta V_{\parallel}$  est indiquée par  $\Delta\theta$ .