

NOSTRADAMUS: UN NOUVEAU SISMOMETRE IONOSPHERIQUE

G. Occhipinti^(1,2), P. Dorey⁽²⁾, V. Bazin⁽²⁾, P. Lognonné⁽¹⁾, (1) Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France, (2) Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques, France.

Abstract. La Tomographie sismique est un puissant moyen pour étudier la dynamique de l'intérieur de la Terre, mais les méthodes de tomographie actuelle de la croûte sont toutes limitées en résolution latérale par le nombre de stations sismiques. Même si les réseaux mondiaux comptent maintenant quelques milliers de stations, et que des projets très ambitieux sont proposés aux USA avec un millier de stations (USArray), les résolutions des méthodes de tomographie sismique sont encore très loin d'imager des structures de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres au niveau d'un continent ou des océans. Cependant, depuis une cinquantaine d'années, l'évolution scientifique a ouvert la voie, avec une série d'observations atmosphériques post-sismiques, à une théorie de la perturbation plus générale qui prend en compte la Terre solide et aussi son atmosphère. La Sismologie ionosphérique pourrait devenir un nouvel outil dans l'évolution de la tomographie de la lithosphère. En effet, les ondes de surface émises à la suite d'un gros séisme vont engendrer par couplage dynamique une onde infra sonique qui se propage, sans être atténuée, jusqu'à la haute atmosphère. Cette perturbation post-sismique a été détectée dans les couches ionosphériques par sondeur Doppler HF ou en utilisant des réseaux denses de stations GPS. Nous présentons ici une nouvelle technique basée sur les propriétés de réflexion ionosphérique des ondes électromagnétiques, émises par un radar transhorizon monostatique. Ce nouveau sondeur nous permettra de mesurer, sur des dizaines de milliers de points appartenant à une surface ionosphérique, la vitesse de déplacement vertical et la vitesse de propagation horizontale de l'onde de Rayleigh. Notons que ces quantités sont, aujourd'hui, mesurées seulement à la surface de la Terre grâce à des sismomètres. La forte densité des points de mesure pourra ouvrir des nouvelles perspectives dans la tomographie lithosphérique.

1 Perturbations post-sismiques

A partir des années soixante, une série d'observations a mis en évidence des effets post-sismiques qui se traduisent par l'apparition de perturbations dans l'ionosphère observées soit par des mesures électromagnétiques [Kelley et al., 1985], soit par l'utilisation de sondeurs ionosphériques [Yuen et al., 1969]. La plupart de ces signaux peuvent trouver une explication dans un couplage dynamique entre la Terre Solide et son atmosphère : le déplacement vertical du sol, généré à proximité de l'épicentre ou à distance télé-sismiques par propagation d'onde de Rayleigh, induit une onde acoustique montant jusqu'au sommet de l'atmosphère. Le déplacement transmis dans l'atmosphère est celui de la surface, soit de l'ordre de quelques millimètres par seconde, ceci reste très faible au regard des échelles de hauteur dans l'atmosphère ; cependant

l'onde de pression ascendante ainsi générée est soumise à un mécanisme d'amplification extrêmement efficace : la densité de l'air décroît de façon exponentielle avec l'altitude donc la conservation de l'énergie ρv^2 impose une croissance exponentielle de l'amplitude de l'onde. L'interaction de l'onde ascendante avec le plasma ionosphérique semble produire des perturbations du Total Electron Content (TEC), mesuré par GPS [Calais & Minster, 1995], et des oscillations des couches E et F observées par des sondeurs Doppler HF pour des séismes de magnitude supérieur à 6.5. La sensibilité des sondeurs Doppler HF semble satisfaire le besoin des méthodes tomographiques; la mesure reste, cependant, ponctuelle et donc équivalente à la mesure au sol fait par sismomètre. Plus récemment des réseaux denses de stations GPS ont permis, grâce à leur étalement spatial, d'imager la propagation de la perturbation acoustique mais uniquement pour des séismes de magnitude supérieur à 8 [Ducic et al., 1998]. La présence d'un nouveau imageur capable de s'affranchir de ces limites (sensibilité et résolution spatiale) semble nécessaire.

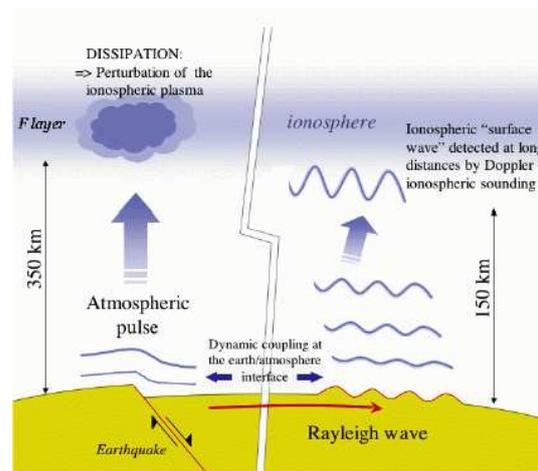


Figure 1: représentation schématique du couplage dynamique post-sismique entre la Terre solide et l'atmosphère en proximité de l'épicentre et à distances télé-sismiques

2 Nostradamus

Dans les années 80, sous l'égide du SPAé, l'ONERA a mené des études de définition du radar transhorizon à onde de ciel NOSTRADAMUS. capable de détecter des cibles à très grandes distances (plus de 1000 km). A la différence des systèmes bistatiques préexistants (ex: JINDALEE en Australie) il s'agit d'un réseau monostatique surfacique capable de s'affranchir des limites de mono-directionnalité du faisceau. Une archi-

REFERENCES

teure en étoile à trois bras lui permet une couverture azimutale de 360 degrés et le contrôle du faisceau en élévation. L'émission multi-fréquence, entre 6 MHz et 28 MHz, associée à la directionnalité du faisceau permet de sonder une surface annulaire avec un rayon compris entre 900 km et 3000 km au sol (fig.2). L'ensemble du réseau est utilisé pour la réception de l'écho renvoyé par le sol et par l'intermédiaire de la réflexion ionosphérique. La sommation de phase du signal récupéré sur chaque antenne nous permet de discriminer la direction de provenance avec une résolution spatiale de quelques km sur l'ensemble du domaine d'action du radar. L'analyse



Figure 2: domaine de sondage du radar trans-horizon Nostradamus : une surface annulaire avec un rayon compris entre 900 km et 3000 km au sol

doppler du signal récupéré est directement associée à la vitesse d'oscillation verticale de la couche ionosphérique de réflexion avec une sensibilité de l'ordre du m/s. Cependant les perturbations attendues sont de l'ordre de 10^2 m/s. Nous présentons ici les premiers tests de résolution, les avantages ainsi que les défauts de ce nouveau "sismomètre".

3 Perspectives

Le radar trans-horizon Nostradamus semble être capable de mesurer, sur une surface ionosphérique d'environ 500 km² avec une résolution de l'ordre de 5 km, la perturbation acoustique post-sismique couplée au sol avec l'onde de Rayleigh. Cependant, dans l'idée de créer un système performant capable de détecter et suivre le front d'onde de la perturbation ionosphérique (fig.3), il est nécessaire de coupler Nostradamus avec un système d'alerte sismique. Une rapide information sur la première localisation du séisme nous permet de prédire la direction d'arrivée du front d'onde afin de choisir la direction de visé du faisceau. L'utilisation d'une alerte donnerait au radar le temps, en attendant le passage du séisme, de sonder l'état ionosphérique et choisir les paramètres du radar les plus adaptés. La forte densité des points de mesure et l'efficacité du système de réponse pourront ouvrir des nouvelles perspectives dans la tomographie lithosphérique.

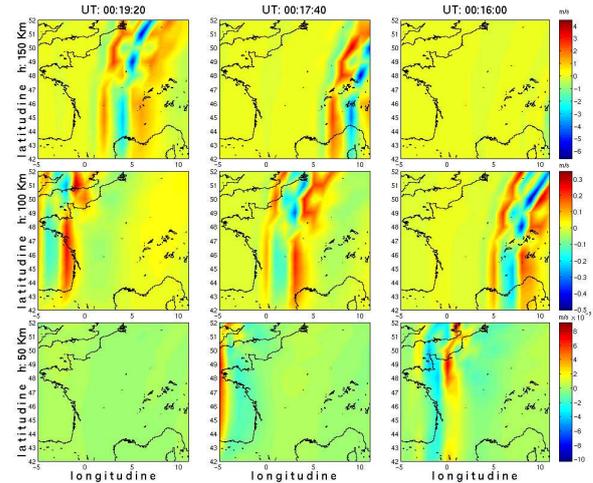


Figure 3: Vitesse du déplacement vertical de la perturbation atmosphérique couplé au sol avec l'onde de Rayleigh calculé par méthode de sommation de modes propres de la Terre, pour le modèle complé Terre solide-atmosphère (PREM+USSA) [Lognonné et al., 1998]. Trois différentes hauteurs 50, 100, et 150 km (du bas vers le haut) et trois différents instants (de droite vers la gauche) sont représentés pour le cas du séisme d'Izmit de magnitude $M_w = 7.5$.

References

- [Calais & Minster, 1995] E.Calais and J.B.Minster, GPS detection of ionospheric perturbations following the January, 1994, Northridge earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 22,9,1045-48, 1995.
- [Ducic et al., 1998] V.Ducic, J.Artru, P.Lognonné, Ionospheric remote sensing of the Denali Earthquake Rayleigh surface waves. *Geophys. Res. Lett.*, 30,18, -, 2003.
- [Kelley et al., 1985] M.C.Kelley, R.Livingston and M.McCready, Large amplitude thermospheric oscillations induced by an earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 12,577-580, 1985.
- [Lognonné et al., 1998] P.Lognonné, E.Clévéde and H. Kanamori, Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode summation for a spherical Earth model with realistic atmosphere. *Geophys. J. Int.*, 135,388-406, 1998.
- [Yuen et al., 1969] P.C.Yuen, P.F.Weaver, R.K.Suzuki and A.S.Furumoto, Continuous, traveling coupling between seismic waves and the ionosphere evident in may 1968 Japan earthquake data. *J. Geophys. Res.*, 74,9, 1968.