

RÉFLEXION ET RÉFRACTION À TRAVERS L'ATMOSPHÈRE D'INFRASONS DUS À DES ÉCLAIRS À MADAGASCAR

RAKOTOARISOA ANDRINIAINA TAHINA⁽¹⁾, RAKOTOZAFY CLAUDINE⁽²⁾, RAMBOLAMANANA GÉRARD⁽¹⁾

1. Laboratoire de Sismologie et d'infrasons, Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo
2. Laboratoire de Géophysique appliquée, Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

Résumé : Depuis septembre 2001, la station infrasonore I33MG enregistre des données provenant de différentes sources dont les éclairs. Celles étudiées ici ont été enregistrées le 27 février 2010 et traitées avec le logiciel WinPMCC intégrant la méthode PMCC. Ces signaux sont classés dans la gamme de haute fréquence (>0.5 Hz). La formulation « temps d'interception-paramètre de rais » est utilisée pour étudier la propagation des infrasons, créés par les éclairs, à travers l'atmosphère afin d'expliquer les résultats obtenus. La célérité apparente de propagation dépend de la température et du vent.

En général, lorsque les éclairs se manifestent, les ondes correspondantes aux sources éloignées d'azimuts compris entre 180° et 360° présentent des phases thermosphériques (It), et entre 0° et 180°, elles présentent des phases thermosphériques (It) et des phases stratosphériques (Is).

Mots clés: infrason, éclair, propagation, onde.

Abstract : Since September 2001, one infrasound station I33MG records events from different sources like lightnings. Those studied here were recorded on 27 February 2010 and were treated with the software WinPMCC integrating the PMCC method. These signals are classified in high frequency range (>0.5 Hz). The formulation "intercept time – ray parameter" is used to study the propagation of the infrasonds, due to the lightnings, through the atmosphere in order to explain the obtained results. The apparent celerity of propagation depends on the temperature and the wind.

Generally, when lightnings occur, the waves related to far sources corresponding to an azimuth comprised between 180° and 360° present thermospheric phases (It), and between 0° and 180°, they present thermospheric (It) and stratospheric (Is) phases.

Key-words : infrasound, lightning, propagation, wave.

I-INTRODUCTION

Dans le cadre du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires, un réseau de 60 stations infrasons a été installé en différents points de la surface terrestre afin de détecter toute explosion nucléaire de moins de 1Kt. Madagascar fait partie de ce réseau depuis septembre 2001, avec le fonctionnement d'une station infrasonore I33MG (47,305°E, 19,011°S) composée de quatre capteurs placés aux sommets d'un triangle équilatéral de 1,5Km de côté et au centre de ce triangle.

En plus des événements artificiels (explosions nucléaires, tirs de carrières, passages d'avions supersoniques), des événements naturels peuvent être enregistrés par la station, tels ceux liés aux : éclairs, marées océaniques, dépressions atmosphériques, éruptions volcaniques. En général, les événements naturels, exceptés les éclairs, sont de basses fréquences, comprises entre 0 et 0.5 Hz ; les événements artificiels et les éclairs sont de hautes fréquences, de 0.5 à 5.0 Hz.

La méthode corrélation progressive multicanaux utilisée pour étudier les signaux produits par les tonnerres dans la gamme de fréquences 0.5-4,0 Hz. Ainsi, nous pourrions déterminer l'orientation de la source et les

caractéristiques des signaux. La propagation des ondes infrasonores à travers l'atmosphère, de la source à la station, a été modélisée. L'altitude de la source est choisie à 0.6 km, hauteur moyenne des cumulonimbus dans les pays tropicaux comme Madagascar.

II-MATERIELS ET METHODES

1. Infrasons produits par les éclairs

Le tonnerre audible est dû au rayonnement acoustique du canal d'ionisation chauffé à plus de 10 000K ; l'onde infrasonore provient de la conversion de l'énergie électrostatique d'un nuage en onde acoustique, l'air chauffé dans le canal d'ionisation produit une onde de choc qui, plusieurs mètres au-delà du canal, se transforme en « onde en N ».

Un autre processus physique a été proposé pour expliquer les ondes infrasonores : le champ électrostatique produit une dépression à l'intérieur du nuage qui est brutalement déchargé. Le calcul prédit une amplitude de pression au sol comprise entre 0.05 et 5 Pa et une fréquence comprise entre 0.2 et 2.0 Hz. L'amplitude dépend de la quantité de charge à l'intérieur du nuage et la fréquence de l'onde, de la dimension du nuage. Lorsque le diagramme de rayonnement de l'onde est très vertical, seul un capteur situé sous le nuage

d'orage peut recevoir le signal correspondant [1].

Selon la couche de réflexion de l'onde, la phase peut être thermosphérique, It, ou troposphérique, Iw, ou mésosphérique, Im, ou stratosphérique, Is. Les célérités En général, la célérité apparente peut varier de 300m/s à 10000m/s.

2. La méthode Progressive Multi-Channel Corrélation, PMCC

La méthode PMCC permet de détecter des événements dans le domaine temporel et utilise la corrélation entre différents groupements de trois stations i, j, k pour obtenir le paramètre *consistency* à partir de l'inverse du RMS des résiduelles de la relation :

$$r_{ijk} = \Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki} \quad (1)$$

Δt_{ij} est le décalage entre les temps d'arrivée de l'onde en la station i et en la station j [2].

L'algorithme PMCC est basé sur l'analyse de plusieurs fenêtres imbriquées de données. On considère des sous-réseaux où tous les éléments du réseau peuvent être utilisés pour le calcul de la valeur initiale du décalage de temps, et donc les valeurs initiales de l'azimut et du vecteur lenteur. On peut ainsi calculer progressivement le paramètre *consistency* pour tout le réseau [3].

Comme les fréquences des tonnerres inaudibles sont fréquemment entre 0.5 Hz et 4.0 Hz, nous avons choisi un filtre de bande passante 0.5-4.0 Hz.

3. Tracé des rais : τ -p

Nous appliquons la théorie de *Buland et Chapman (1983)* développée pour la sismologie [4]. Une onde se propageant dans un milieu mobile est influencée par la vitesse du milieu, la température, le vent zonal et le vent méridional.

La vitesse de propagation de l'onde infrasonore ou la célérité effective s'écrit :

$$C_{\text{eff}}(z) = \hat{n} \cdot \vec{V} + C(z) \quad (2)$$

\hat{n} , normale au front d'onde,

\vec{V} vitesse du vent,

$C(z)$ célérité statique,

$C(z)$ est égale à $\sqrt{\gamma RT}$ avec γ rapport des chaleurs spécifiques, R constante des gaz parfaits, T température absolue ; pour l'air $\gamma R = 402.8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Pour tracer les rais p, nous utilisons la loi de Descartes-Snell :

$$p = \frac{\sin \theta}{C(z) + \sin \theta (v(z) \cos \phi + u(z) \sin \phi)} \quad (3)$$

Où θ est l'angle d'incidence, $u(z)$ et $v(z)$ sont les composantes zonale WE et méridionale NS de la vitesse du vent.

Le temps ΔT_k et la distance horizontale ΔX_k parcourue par l'onde infrasonore pour passer de la couche k à la couche k+1 sont :

$$\Delta T_k = \frac{\Delta z}{C_{\text{eff}}(z_k) \cdot \cos \theta_k} \quad (4)$$

$$\Delta X_k = \Delta z \tan \theta_k \quad (5)$$

Soient le temps total T_i et la distance horizontale totale X_i :

$$T_i = \sum_{k=1}^i \Delta T_k \quad (6)$$

$$X_i = \sum_{k=1}^i \Delta X_k \quad (7)$$

Où i représente le nombre de couches traversées par le rayon d'onde.

La représentation graphique de T_i en fonction de X_i permet d'avoir la courbe de temps parcourus.

On définit la fonction τ , temps d'interception, fonction de la longitude par :

$$\tau = \frac{1 - p(u(z_k) \sin \phi + v(z_k) \cos \phi)}{C(z_k)}$$

$$\sqrt{\left[1 - \frac{p^2 C^2(z_k)}{[1 - p(u(z_k) \sin \phi + v(z_k) \cos \phi)]^2} \right]} \Delta z \quad (8)$$

La représentation graphique de τ en fonction de z et p permet de décrire le comportement de l'onde à travers l'atmosphère [5]. La composante de célérité captée par la station est la vitesse horizontale du front d'onde c'est-à-dire la célérité apparente de l'onde infrasonore. La relation entre la célérité apparente et la célérité effective est :

$$C_{\text{app}} = \frac{C_{\text{eff}}}{\sin \theta} \quad (9)$$

Les signaux enregistrés à la station infrasonore I33MG ont été traités avec le logiciel WinPMCC intégrant la méthode PMCC.

4. Les données utilisées

Nous avons traité une partie des signaux produits par des éclairs ayant eu lieu le 27 février 2010 de 14h12mn à 15h50mn GMT dans la zone encadrée en rouge de la **figure 1**. Ce sont les événements enregistrés de 15h00 à 15h50 GMT.

La **figure 2** représente les données moyennes annuelles de température et de vent à 15h30GMT aux coordonnées 21.2018°S et 46.7772°E et jusqu'à une altitude de 180 km ; la tropopause, la stratopause et la mésopause se trouvent respectivement à 15, 50 et 100 km.

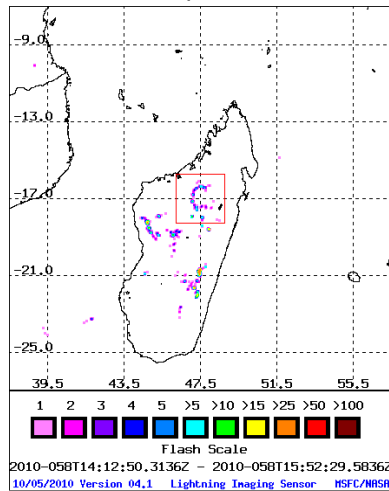


Figure 1: Image de la NASA montrant les éclairs à Madagascar le 27/02/2010 à partir de 14 h 12mn jusqu'à 15h52mn GMT (dans le cadre en rouge)

III-RESULTATS

Les résultats du traitement par PMCC des données de pression atmosphérique enregistrées par la station I33MG le 27 février 2010 de 15h33 à 15h50 GMT sont montrés sur la **figure 3** : RMS de l'amplitude de la pression atmosphérique, azimuth et vitesse de l'onde, variations de la pression atmosphérique en chaque capteur.

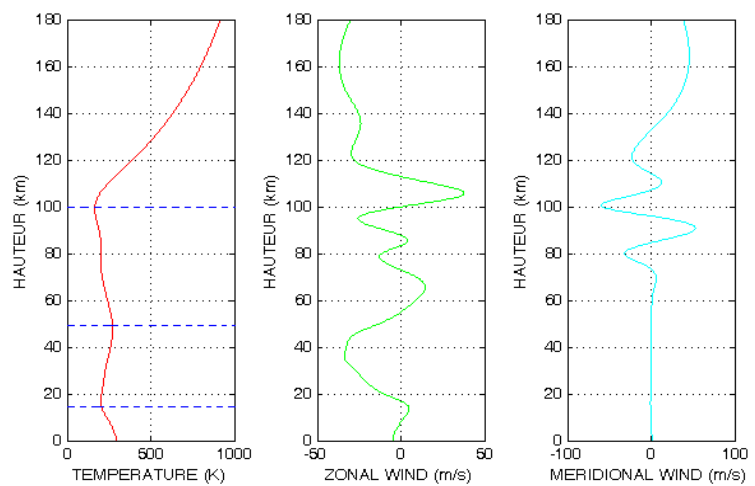


Figure 2 : profils de température et de vent au point de coordonnées 16.4855°S et 47.7772°E le 27 février 2010 à 15h30mn GMT [6] (HWM/MSIS ou Horizontal Wind Model/Mass Spectrometer-Incoherent Scatter).

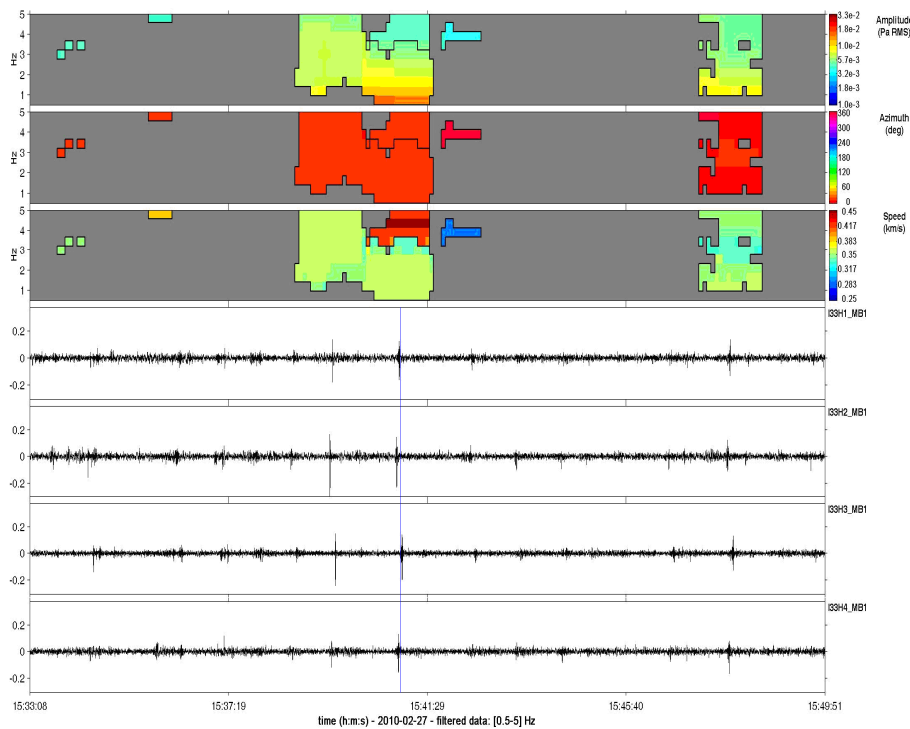


Figure 3 : caractéristiques des infrasons liés à tous les événements enregistrés par la station de 15h33 à 15h 50mn, le 27 février 2010.

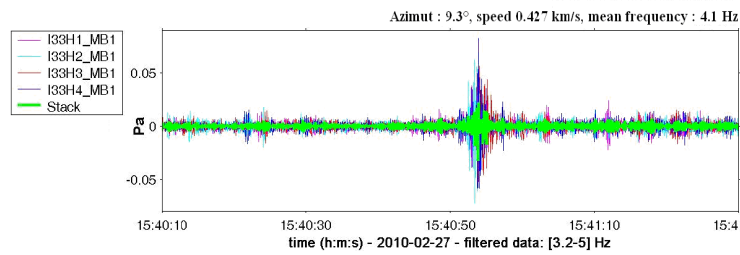


Figure 4 : variations de la pression relative à un événement d'azimut 9.3°, ayant eu lieu à 15h41mn, le 27 février 2010

La **figure 4** représente pour un événement d'azimut 9.3° par rapport à la station (189.3° par rapport à la source) : amplitude de la pression variant de 0.01 à 0.100 Pa à l'arrivée de l'onde de choc ; la célérité apparente valant 427m/s et la fréquence 4.1 Hz.

En utilisant les modèles de vent et de température de la **figure 2**, nous avons obtenu les **figures 5, 6 et 7**.

Sur la **figure 5**, temps d'interception τ en fonction de l'angle de lancement ; nous nous intéressons particulièrement aux temps d'interception nuls, de couleur bleue foncée.

Sur la **figure 6**, tracés des rais dans un plan vertical donné (hauteur de la source : 0.6km,

pas de l'angle de lancement : 2°), les courbes de couleur noire représentent les ondes arrivant à des altitudes supérieures à 160km, les courbes bleues et violettes d'angles par rapport à la verticale inférieurs à 90° sont réfléchies entre 120 et 130 km, les rouges avec des directions supérieures à 90° représentent les ondes qui sont réfléchies au sol puis à des altitudes supérieures à 120 km.

Les **figures 6 et 7**, tracés de rais et temps de parcours pour des altitudes allant jusqu'à 180km et distances parcourues par les ondes, dans le plan vertical contenant la source et la station, jusqu'à 500km.

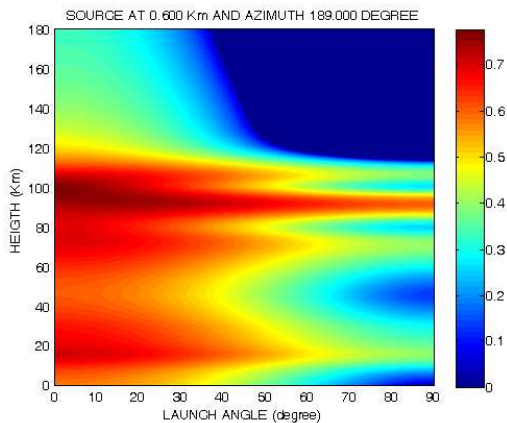


Figure 5 : temps d'interception τ en fonction de l'angle de lancement et de l'altitude pour une source à 600 m en hauteur

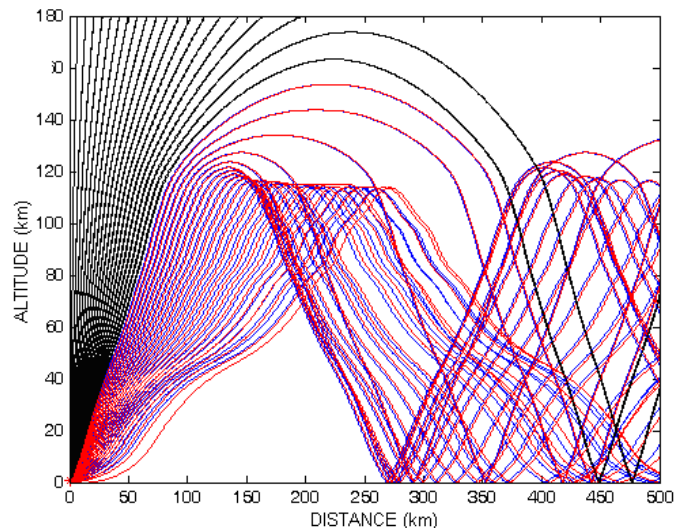


Figure 6 : Les rais correspondant aux modèles de température et de vent pour une source d'azimut 183,3° (station par rapport à la source) et d'altitude 0.600km.

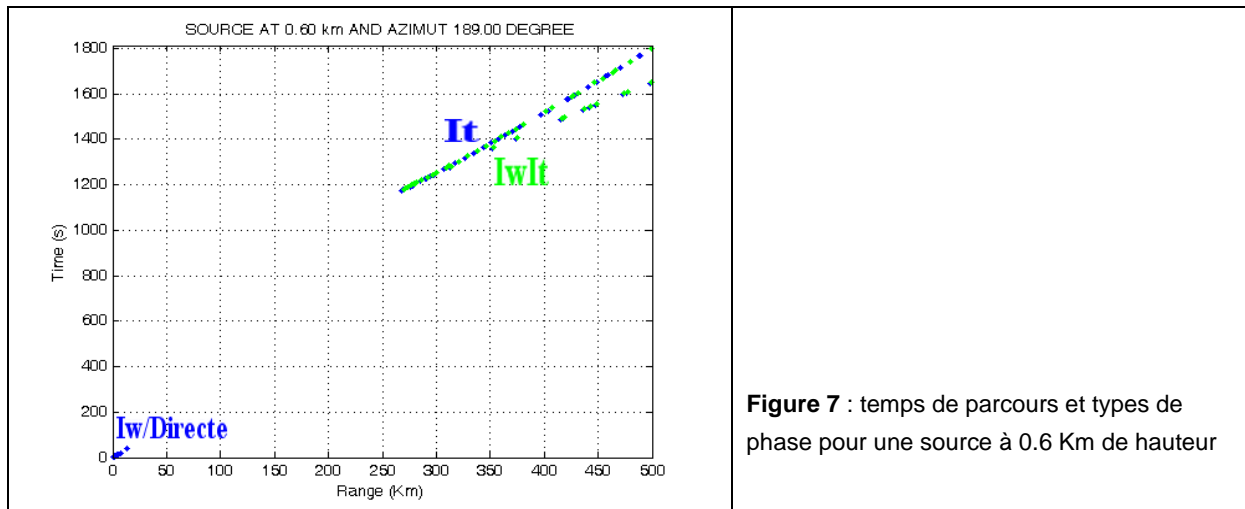


Figure 7 : temps de parcours et types de phase pour une source à 0.6 Km de hauteur

IV-DISCUSSIONS

Dans l'étude des infrasons de haute fréquence, le filtre utilisé pour la représentation de la **figure 3** est 0,5-5,0 Hz. Dans la série de résultats obtenus avec le logiciel *WinPMCC*, la majorité des événements présentent des azimuts inférieurs à 30°, les variations de pression ($5,7 \cdot 10^{-3}$ – $3,3 \cdot 10^{-2}$ Pa) correspondent à des sources relativement importantes ; les célérités apparentes des infrasons vont de 0,35 à 0,45 Km/s, ces célérités dépendent des angles d'incidence de l'onde sur les capteurs de la station ; tous les événements sont enregistrés par les quatre capteurs et les signaux de grande amplitude correspondent au passage des ondes de choc.

Parmi ces résultats nous avons traité par la suite celui correspondant à un azimut de 9,3° avec un filtre de 3,2-5,0 Hz. Les variations de pression correspondantes, sont localisées autour de 15h41min02s (**figure 4**). La méthode PMCC a donné une célérité apparente de 427 m/s.

La principale caractéristique de la fonction τ , **figure 5**, est qu'elle ne présente des valeurs nulles qu'à partir d'une altitude de 120 km à cause du vent d'Est dans la partie stratosphérique (**figure 1**) atteignant 40 m/s ; le vent d'Est explique la présence de phases It et IwIt et l'absence de phases Is.

Sur le **figure 6**, les tracés de rais montrent qu'on a une zone d'ombre pour les distances horizontales (dans le plan vertical station-source) comprises entre 20 et 270 km ; les célérités des ondes étant faibles dans la troposphère, la stratosphère et la mésosphère ; à partir d'un angle de lancement de 35° les phases sont thermosphériques It, et

les ondes correspondantes arrivent à des distances horizontales de plus de 270km.

D'après la **figure 7**, les ondes à phases It et IwIt sont réfléchies à deux niveaux distincts : altitude 120 km et altitude supérieure à 120 km ; les temps de parcours augmentent de façon linéaire avec la distance, les pentes des droites représentent les inverses de vitesses. La célérité de propagation des ondes directes ou à phase Iw est d'environ 500 m/s ; celle des ondes réfléchies dans la haute thermosphère, phases It ou IwIt est d'environ 375 m/s.

A partir de 120 km d'altitude, la température croît progressivement et les ondes deviennent plus rapides (**figure 5**) et les ondes ne sont réfléchies qu'à partir de cette altitude. Ainsi on peut considérer l'atmosphère allant de 0 à 180 km comme la superposition de deux couches, la partie inférieure d'altitude inférieure à 120 km et la partie supérieure d'altitude supérieure à 120 km. La valeur 120 km, plus grande de 20 km par rapport à celle de mésopause indiquée sur la **figure 2**, s'explique par l'effet conjugué de la température et des composantes du vent.

En conclusion, la méthode ne peut pas être utilisée dans le cas de stations situées en zone d'ombre ; par ailleurs, la méthode ne tient compte ni des ondes diffractées ni de la topologie ; il existe encore d'autres paramètres pouvant entrer en jeu dans la propagation tels l'absorption, la dispersion, topologie et la diffraction de l'onde. L'étude d'infrasons peut être améliorée en tenant compte de ces divers paramètres.

REFERENCES

[1] **Farges T., Blanc E.** Avril 2010, Infrason des éclairs et des sprites: caractéristiques et intérêt pour la validation de modèles de propagation.

[2] **Cansi Y., Klinger Y.**, 1997, An automated data processing method for mini-arrays. Newsletter of the European-Mediterranean Seismological Center, 11, 2-4.

[3] **Cansi Y.**, 1995, An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C.

method. Geophysical Research Letter, 22, 1021-1024

[4] **Buland R., Chapman C.**,1983. The computation of seismic travel times, Bull.seism.Soc.Am,73, 1271-1302

[5] **Garcés M. A., Hansen R. A., Lindquist K. G.**, 1998. Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere, Geophysical Journal International, Volume 135, Issue 1, pp. 255-263.

[6] **nssdcftp.gsfc.nasa.gov**