



ANALYSE TEMPS-FREQUENCE DU SIGNAL RETRODIFFUSE D'UN LIDAR POUR L'ETUDE DES ONDES DE GRAVITE DANS L'ATMOSPHERE

Franck MOLINARO, Hassan BENCHERIF, Miloud BESSAFI

Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Université de la Réunion
15 Av. René Cassin, BP 7151, 97715 SAINT DENIS CEDEX 9, FRANCE
Tel : (262)93-82-52 Fax : (262)93-81-66 Mail : molinaro@helios.univ-reunion.fr

RESUME

Le LIDAR est un LASER qui envoie des impulsions dirigées verticalement dans l'atmosphère. L'analyse du signal rétrodiffusé (ou réémis) par l'atmosphère permet d'obtenir des informations sur sa structure et sa composition en fonction de l'altitude. Après quelques traitements, on extrait un profil de température du profil de densité reçu. Les perturbations de température sont associées au phénomène d'ondes de gravité. Il est maintenant reconnu que les ondes de gravité jouent un rôle primordial dans la circulation et la modélisation à grande échelle de l'atmosphère moyenne. L'objectif de l'étude est de déterminer les caractéristiques des ondes de gravité (longueur d'onde et localisation spatiale en particulier) au dessus de l'île de la Réunion. Plusieurs séquences de tirs sont analysées à l'aide d'une représentation temps-fréquence usuelle : la distribution de pseudo Wigner-Ville lissée.

I. INTRODUCTION

Le LIDAR (Light Detection And Ranging) est un ensemble qui fonctionne en fait comme un "radar optique". Un LASER envoie des impulsions verticalement dans l'atmosphère. Le signal rétrodiffusé par l'atmosphère est par la suite traduit en profil de température fonction de l'altitude.

Les perturbations de température par rapport au profil moyen servent souvent de base aux travaux effectués en modélisation de l'atmosphère. Elles sont associées à des déplacements verticaux et horizontaux de masses d'air résultant de la propagation des ondes de gravité.

L'objectif de l'étude est de déterminer les caractéristiques des ondes de gravité au dessus de la Réunion pour en faire un répertoire à l'aide des outils d'analyse temps-fréquence.

Les parties 2 et 3 décrivent le dispositif expérimental ainsi que le phénomène d'onde de gravité. Dans la partie 4, on montre comment on obtient le signal de perturbations en température à étudier à partir du profil de température de base. Ce signal de perturbations est analysé en temps-fréquence dans la partie 5. Enfin, on conclut sur les résultats obtenus et sur l'intérêt de l'emploi des techniques temps-fréquence pour cette application.

ABSTRACT

The LIDAR is a LASER beam which sent vertically monochromatic pulses in the atmosphere. The analysis of the backscattered light provides information about the vertical structure and composition of the atmosphere versus height. The temperature profile is deduced from the recorded density profile. Temperature perturbations are associated with gravity waves phenomenon. It is now widely recognized that atmospheric gravity waves play a major role in determining the large scale circulation and structure of the middle atmosphere. The aim of the study is to identify characteristics of these particular waves (vertical wavelength, height...) above Reunion island. Different perturbation signals are analysed with an usual time-frequency tool : the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le LIDAR comme système d'observation de l'atmosphère est apparu au début des années 1980 [1]. Il complète la panoplie des outils d'investigations de l'atmosphère (ballons sondes, fusée, satellites) en proposant des mesures en continue, fiables et avec une meilleure résolution verticale pour un endroit déterminé.

Le LIDAR de l'Université de la Réunion fonctionne depuis mai 1994. Un LASER envoie une série d'impulsions verticalement dans l'atmosphère. La partie du signal rétrodiffusé par l'atmosphère est reçue par un télescope (ensemble de miroirs) qui dirige le signal vers une fibre optique. Après un filtrage optique, un photomultiplicateur convertit l'énergie lumineuse en tension. Ensuite, le signal est filtré et amplifié puis une chaîne électronique de comptage permet de déterminer le nombre de photons rétrodiffusés par tranche d'altitude. Le résultat final est numérisé puis stocké sur un micro-ordinateur qui pilote la mesure. Le schéma de fonctionnement du LIDAR est donné par la *figure 1*. Le LASER utilisé est du type Nd-YAG, l'émission s'effectuant dans le vert à 532 nm. On trouve dans le *tableau 1* les principales caractéristiques de l'émission et de la réception.

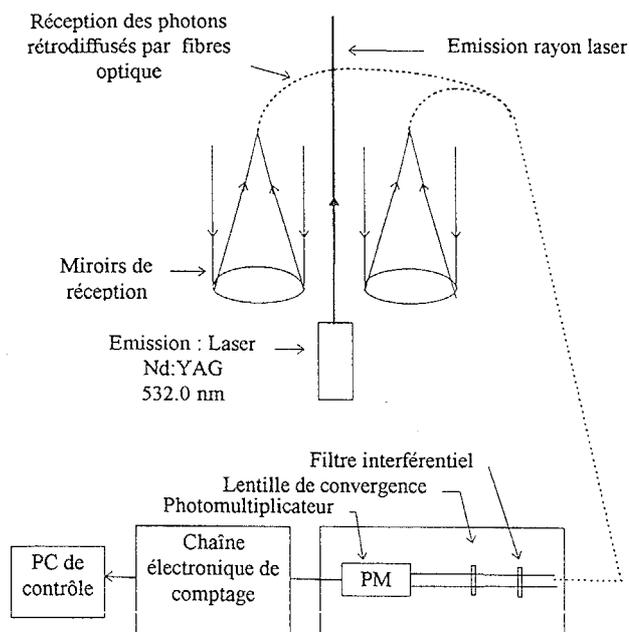


figure 1 - schéma de fonctionnement d'un LIDAR

EMISSION		RECEPTION	
Laser	Nd-YAG	Surface miroirs	0,7 m ²
Longueur d'onde	532 nm	Résolution	150 m
Energie par impulsion	300 mJ	Mode de détection	Comptage photons
Fréquence de tirs	10 Hz	Champ de vue	3.10 ⁻⁴ rad
Divergence faisceau	10 ⁻⁴ rad	Mise en route	Mai 1994

Tableau 1 - principales caractéristiques du LIDAR

Le signal rétrodiffusé est proportionnel à la densité de la couche analysée. A partir du profil de densité obtenu, on en déduit un profil de température sous les hypothèses d'équilibre hydrostatique et que l'air est un gaz parfait. Le gradient des profils de température permet d'identifier les différentes régions atmosphériques [2]. Sur la figure 2 est exposée une coupe verticale de l'atmosphère.

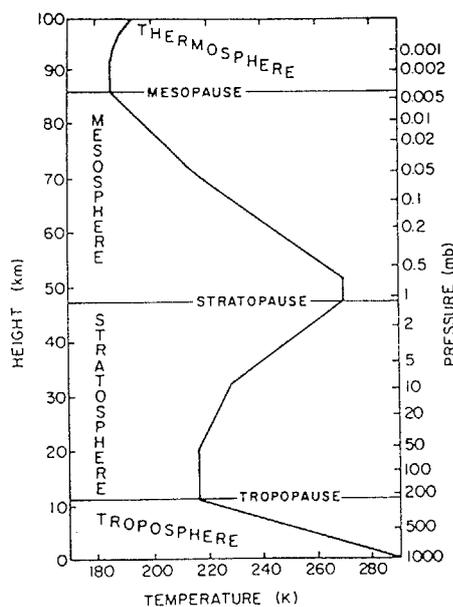


figure 2 - Profil de température basé sur le modèle standard (US 1976)

Avec le LIDAR Rayleigh, les mesures de températures sont limitées vers le bas (30 km) par la présence d'aérosols et vers le haut (90-100 km) par le bruit instrumental et le fond de ciel nocturne.

3. INTERET DE L'ETUDE DES ONDES DE GRAVITE

L'étude des ondes de gravité a connu un essor important à la suite des premiers essais de modélisation de la circulation de la moyenne et haute atmosphère. Ainsi, il est impossible de comprendre la distribution de température et la circulation générale de la mésosphère sans prendre en compte une source locale de quantité de mouvement. Les ondes de gravité constituent très vraisemblablement un des mécanismes capable de transporter verticalement la quantité de mouvement et l'énergie nécessaire. Les flux de quantité de mouvement et d'énergie transportés par les ondes de gravité et pénétrant dans la mésosphère sont fonction de la génération des ondes dans la troposphère, de leur transmission dans la stratosphère et la mésosphère et de la nature des processus de saturation et de dissipation [3].

Les mécanismes de génération des ondes de gravité sont nombreux. Les plus importants sont l'orographie (le relief), les systèmes convectifs (les nuages) et le cisaillement des jets (vent fort).

De nombreuses questions se posent aussi bien théoriques que sur les caractéristiques spatiales et temporelles des ondes de gravité dans la stratosphère et la mésosphère. Les observations concernant ce phénomène commencent à exister [4] mais sont néanmoins extrêmement rares entre les tropiques et au dessus des océans. La position privilégiée de la Réunion peut permettre de pallier en partie à ce manque.

4. OBTENTION DU SIGNAL DE PERTURBATION EN TEMPERATURE

Les données LIDAR utilisées pour l'analyse sont les profils de température obtenus pendant une nuit de mesure (le 28/11/94). La résolution en altitude est de 150 m. Ces données correspondent à une séquence de 10000 tirs soit une intégration temporelle d'environ 15 minutes.

Dans le calcul du profil de température, le rapport signal/bruit diminue avec l'altitude. Pour réduire le bruit, supposé gaussien, on effectue une moyenne sur un grand nombre de tirs. Une analyse détaillée de l'erreur [3] permet de conclure que les perturbations de températures sont décelables dans le bruit jusqu'à environ 60 km d'altitude pour 1/4 d'heure.

Le problème est d'extraire le signal de perturbation à partir du profil de température d'1/4 d'heure. A partir d'un profil de base, on calcule le profil moyen en le filtrant par un passe-bas. Après plusieurs essais, le filtre choisi est un filtre RII de Butterworth d'ordre 5 et de fréquence de coupure normalisée 0,025 (longueur d'onde de 12km). Ensuite, ce profil moyen est soustrait au profil initial pour donner le signal de perturbation

en température qui va être le signal à analyser (voir figures 3a et 3b).

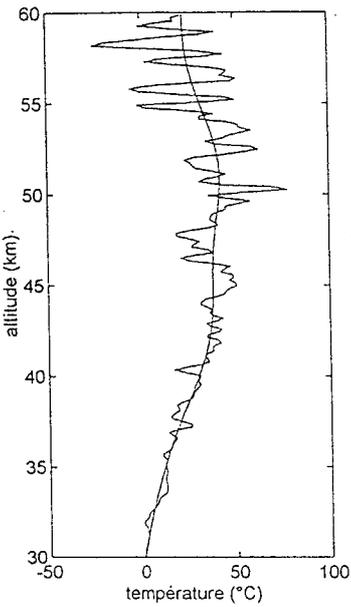


Figure 3a - En trait gras le profil de température moyen. En trait fin le profil initial

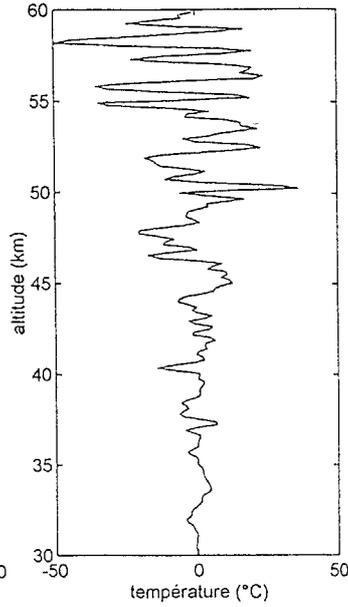


Figure 3b - Signal de perturbation : soustraction du profil moyen au profil initial

5. ANALYSE TEMPS-FREQUENCE

Les signaux de perturbation recueillis sont analysés en temps-fréquence par la distribution de pseudo Wigner-Ville lissée (DPWVL).

5.1 Présentation de la DPWVL

Depuis le début des années 80, l'étude des représentations temps-fréquence est en plein essor pour caractériser les signaux non stationnaires. La distribution de Wigner Ville occupe une place centrale dans la famille des représentations non paramétriques. On peut trouver un répertoire conséquent des représentations temps-fréquence dans [5].

La distribution de Wigner-Ville d'un signal $x(t)$ s'écrit :

$$DWV_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

L'originalité de cette transformation par rapport à la transformée de Fourier vient du produit $x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)$ qui lui donne de nombreuses propriétés intéressantes. Par exemple, elle permet une localisation parfaite des lois de modulations en fréquence. Par contre, cette structure fait apparaître des valeurs négatives et des termes d'interférences [6].

En pratique, on utilise la DPWVL. Un signal $x(t)$ s'exprime dans le plan temps-fréquence, avec la DPWVL, sous la forme :

$$DPWVL_x(t, f) = \iint |h\left(\frac{\tau}{2}\right)|^2 \left[\iint g(u-t) x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du \right] e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

L'utilisateur doit fixer la fenêtre h d'observation à court terme (qui fixe la résolution fréquentielle) et la fenêtre g de lissage temporelle qui permet la réduction des termes interférentiels [6].

5.2 Analyse des signaux de perturbations en température

Les signaux de température sélectionnés couvrent la tranche d'altitude 30-60 km. Pour une résolution de 150 m, cela correspond à 200 points.

Par rapport aux diagrammes temps-fréquence habituels, le rôle du temps est tenu par l'altitude. En ordonnée, à la place de l'habituelle fréquence, on obtient alors l'inverse de la longueur d'onde.

Plutôt que de présenter plusieurs diagrammes temps-fréquence, ce qui aurait posé un problème de place, on a préféré montrer l'application de la DPWVL sur un fichier perturbation. La figure 4.a représente l'image temps-fréquence d'un fichier perturbation. Au dessus, on visualise le signal brut fonction de l'altitude, à droite le spectre global du signal. Pour caractériser au mieux les ondes de gravité, un zoom est effectué figure 4.b sur la tranche d'altitude comprise entre 45 et 60 km. Ce zoom permet de bien localiser les caractéristiques des deux ondes qui apparaissent. Une onde est située entre 48 et 58 km d'altitude pour une longueur d'onde autour de 3 km. L'autre ce trouve à une altitude plus élevée : entre 53 et 60 km pour une longueur d'onde plus faible de 1,3 km.

6. CONCLUSION

L'étude montre comment à partir du signal rétrodiffusé d'un LIDAR on peut extraire un signal de perturbations en température. L'analyse temps-fréquence du signal de perturbations par la DPWVL permet de bien localiser en altitude et longueur d'onde les ondes de gravité. Après une analyse systématique d'un grand nombre de données par cette méthode, un répertoire regroupant les caractéristiques des ondes de gravité au dessus de la Réunion pourra être dressé.

La méthode employée sur ce type de signal peut aisément être appliquée à d'autres signaux géophysiques non stationnaires, en particulier quand le nombre de points est relativement faible.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. HAUCHECORNE, M.L. CHANIN, P. KECKHUT, *Climatology of the middle atmospheric temperature (30-90 km) and trends as seen by Rayleigh lidar above South of France*, Journ. of geophys. res., vol 96, p15297-15309, 1991.
- [2] D.G.ANDREWS, J.R.HOLTON, C.B.LEOVY, *Middle Atmosphere Dynamics*, Academic Press, 1987.
- [3] R.WILSON, *Climatologie des ondes de gravité dans l'atmosphère moyenne : observation par Lidar Rayleigh et interprétation*, thèse de Paris 6, 1989.
- [4] R.WILSON, M.L.CHANIN, A.HAUCHECORNE, *Gravity waves in the middle atmosphere observed by Rayleigh Lidar*, Journ. of geophys. res., vol 96, p5153-5167, march 20, 1991.
- [5] P.FLANDRIN, N.MARTIN and al, *Méthodes temps -fréquence*, Traitement du signal vol 9, supplément au n°1, 1992.
- [6] P.FLANDRIN, B.ESCUDE, *Principe et mise en oeuvre de l'analyse temps-fréquence par transformation de Wigner-ville*, Traitement du signal vol 2, n°2, 1985.

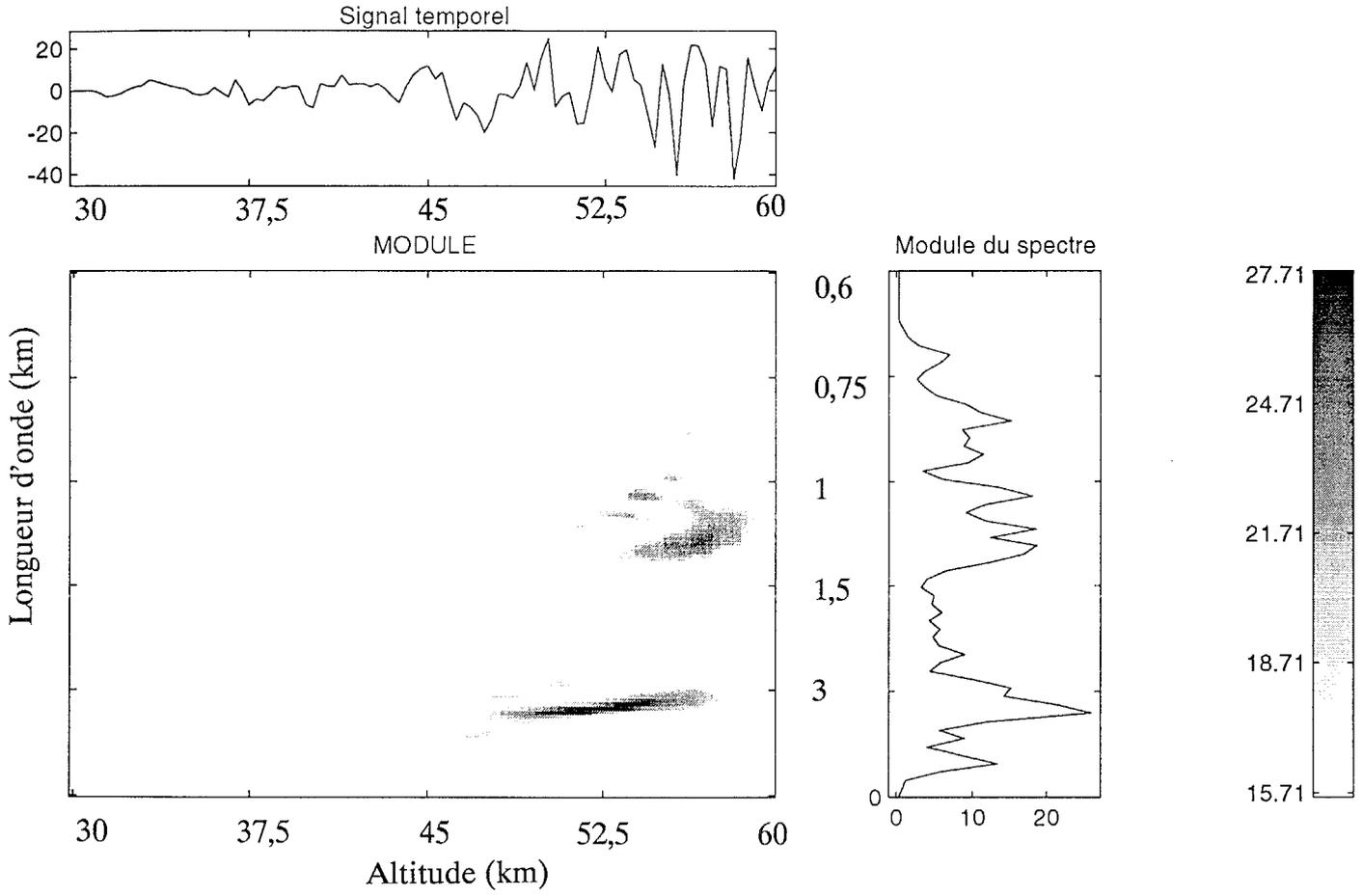


Figure 4.a - Image "temps-fréquence" d'un fichier perturbations de température

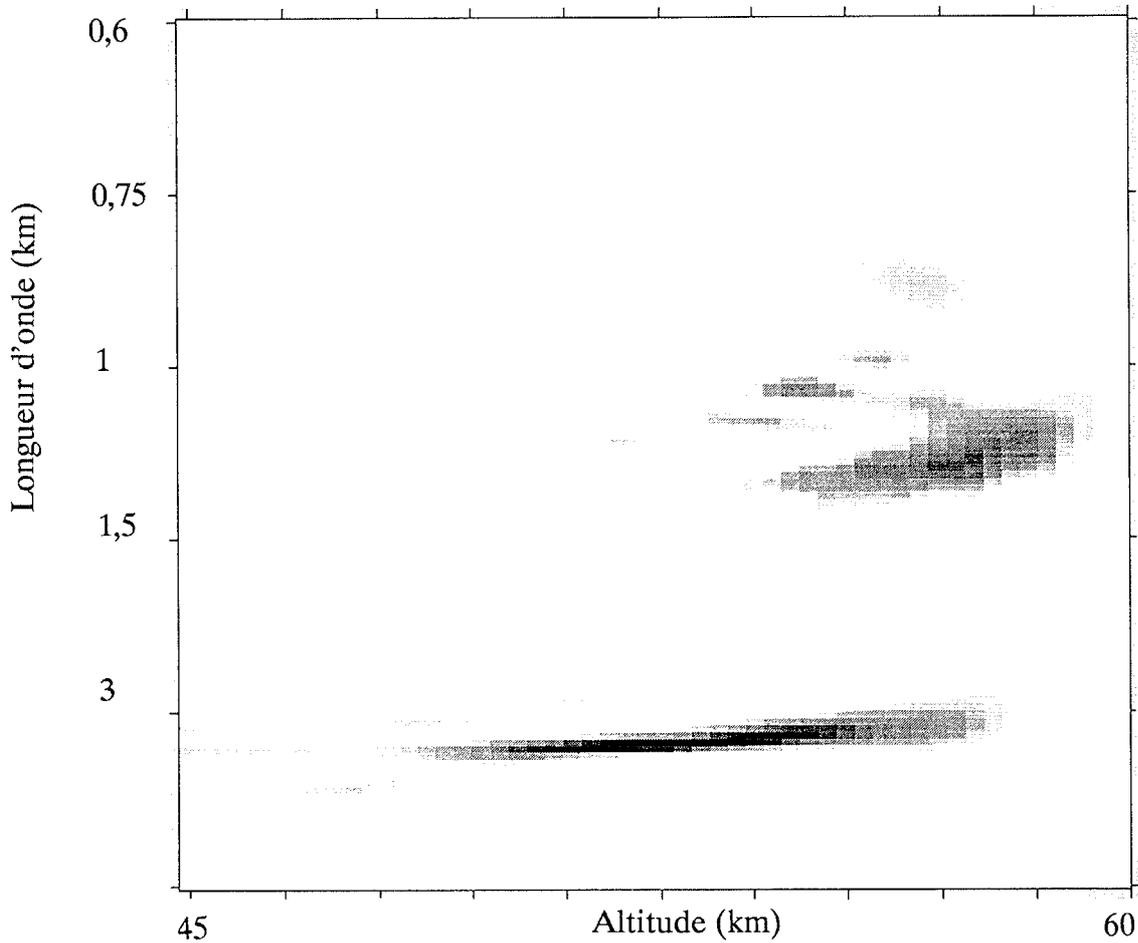


Figure 4.b - Zoom de l'image "temps-fréquence" entre 45 et 60 km