

Applications de l'analyse en ondelettes sur un signal géophysique

Fabrice Chane-Ming, Franck Molinaro et Jean Leveau

Laboratoire de Physique de l'Atmosphère
Université de la Réunion
15 Av. René Cassin, BP 7151,
97715 Saint Denis Cedex 9, France
e-mail : fchane@univ-reunion.fr

RÉSUMÉ

Ce papier propose différentes techniques pour caractériser un signal géophysique à partir de la transformée en ondelettes continue et de l'analyse multirésolution. Tout d'abord, nous présentons des outils pour caractériser et extraire les structures ondulatoires dominantes du signal et ensuite trois méthodes originales pour déterminer la vitesse de phase verticale sur des signaux successifs.

Le signal géophysique étudié pour illustrer ces méthodes est un signal LIDAR dont la structure thermique verticale de 30 à 60 km d'altitude au-dessus de la Réunion (21°S, 55°E) est déduite. Ces méthodes peuvent être étendues à d'autres domaines géophysiques ayant des signaux du même type : sonar, radar, réflectométrie.

1 Introduction

Les outils à base d'ondelettes sont maintenant couramment employés pour l'analyse de signaux géophysiques. La première transformée en ondelette continue de Morlet a été appliquée en projection pétrolière sur des signaux sismiques en 1984. Depuis, ces outils se sont révélés efficaces pour l'analyse des signaux non-stationnaires contenant des structures d'échelle différente et des événements transitoires.

Le signal géophysique utilisé pour illustrer ces techniques issues de l'analyse en ondelettes est déduit des mesures obtenues par l'instrument LIDAR. Ces techniques permettent l'identification et l'extraction des structures ondulatoires dominantes d'échelle différente comme les ondes de gravité du profil de fluctuation de température. On s'intéresse à de telles ondes car elles contribuent énergétiquement à la circulation de la haute atmosphère [1]. Ces ondes résultent des forçages en basse atmosphère comme l'orographie, la convection, les perturbations atmosphériques ... Ces ondes à vitesse de phase négative transportent verticalement de l'énergie loin des sources en interagissant avec le milieu par différents processus comme l'amplication, la réflexion, l'intermodulation et la dissipation. On observe alors la présence de modes différents suivant l'altitude.

Ce papier présente l'utilisation de différentes techniques d'ondelettes appliquées à un signal géophysique. Ces techniques et le signal LIDAR sont présentés dans les parties 2 et 3. La caractérisation des formes d'ondes prédominantes est effectuée dans la partie 4 en utilisant les techniques

ABSTRACT

This paper proposes different techniques to characterize a geophysical signal by the use of continuous wavelet transform and multiresolution analysis. Firstly, we present tools to characterize and to extract dominant wavelike structures from the signal and then three original methods to determine vertical phase speed from successive signals.

To illustrate these methods, the studied geophysical signal is a LIDAR signal from which the vertical thermal structure from 30 to 60 km height above Réunion island (21°S, 55°E) is deduced. These methods can be extended to other fields of geophysics with similar kind of signals : sonar, radar, reflectometry.

d'analyse continue en ondelettes suivies de l'analyse multirésolution pour l'extraction de ces ondes. Ensuite, dans la partie 5, un problème important pour ce genre d'applications est abordé: la détermination de la vitesse de phase. Nous proposons trois méthodes adaptées à ce problème. Tous ces traitements sont illustrés sur un profil vertical de température issu d'un LIDAR.

2 Techniques d'analyse en ondelettes

2.1 La transformée en ondelette continue

Les coefficients de la transformée en ondelettes continue correspondent aux termes de projection du signal à analyser sur une base de fonctions élémentaires résultant de la dilatation et de la translation d'une ondelette analysante ou "mère" traduite par la relation ci-dessus [2].

$$CW(a,b) = \int f(t) \bar{g}_{ab}(t) dt = f(b) * \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{g}\left(\frac{-b}{a}\right) \quad (2.1.1)$$

$$g_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.1.2)$$

avec (a,b) : paramètres d'échelle et de translation en temps

* : produit de convolution $\bar{\cdot}$: conjugaison

f : signal analysé g : ondelette analysante

L'analyse graphique est améliorée par l'introduction de voies dans le paramètre d'échelle a .

L'ondelette analysante doit cependant satisfaire à des conditions mathématiques d'admissibilité de telle sorte que l'énergie soit conservée et que le signal analysé puisse être reconstruit. Pour ce faire, cette dernière doit être oscillante et à moyenne nulle. Dans cette étude, on utilise l'ondelette de Morlet et la huitième dérivée de la gaussienne. La forme gaussienne donne une localisation optimale dans l'espace temps-échelle ou altitude-longueurs d'onde verticale. La propriété de progressivité de l'ondelette de Morlet est utilisée pour déterminer l'évolution de la phase des structures ondulatoires.

2.2 L'analyse multirésolution

L'analyse multirésolution consiste à décomposer successivement le signal suivant un terme d'approximation a_i et un terme de détail d_i aux différentes échelles. Cette décomposition est obtenue en appliquant un banc de filtres orthogonaux construit de façon à permettre une reconstruction parfaite du signal initial [3]. Ces filtres correspondent en fait à une paire d'ondelettes analysantes dites fonction d'échelle et fonction ondelette. L'implémentation de l'analyse multirésolution est facilitée par l'emploi de filtres grâce à un schéma de type pyramidal. Le signal s peut alors s'exprimer de la manière suivante :

$$s \cong d_1 + d_2 + d_3 \dots + d_i + a_i$$

L'ondelette de Daubechies de moments nuls d'ordre 8 permet l'extraction des composantes ondulatoires du signal de fluctuation de température [4].

3 Le signal LIDAR

Depuis ces deux dernières décennies, l'instrument LIDAR (Light Detection And Ranging) est utilisé pour sonder et observer la structure thermique verticale l'atmosphère. Ce système de mesures quasi-instantanées et continues fonctionne comme un "radar optique". Un laser émet verticalement des impulsions dans l'atmosphère [5]. Le signal rétrodiffusé (ou réémis) par l'atmosphère est intercepté par des miroirs et converti en profil vertical de densité à l'aide de l'équation LIDAR. Sous les hypothèses de gaz parfait et d'équilibre hydrostatique pour la tranche de 30 à 60 km d'altitude, le profil vertical de densité permet d'établir le profil vertical de température qui nous servira de support dans l'application des techniques en ondelettes.

Depuis mai 1994, un LIDAR Rayleigh, installé à l'île de la Réunion (21°S, 55°E), permet en outre l'observation des ondes de gravité dans la moyenne atmosphère intertropicale sud [6].

On utilise une nuit de mesures composée de 12 fichiers enregistrés toutes les demi-heures avec une résolution en altitude de 300 m. En soustrayant le profil moyen du signal brut, on extrait le signal de fluctuation de température qui est attribué aux ondes de gravité. Ce dernier est le résultat de l'application d'un filtre passe-bas RII de Butterworth d'ordre 5 de longueur d'onde verticale de coupure de 12 km. (Figure 1).

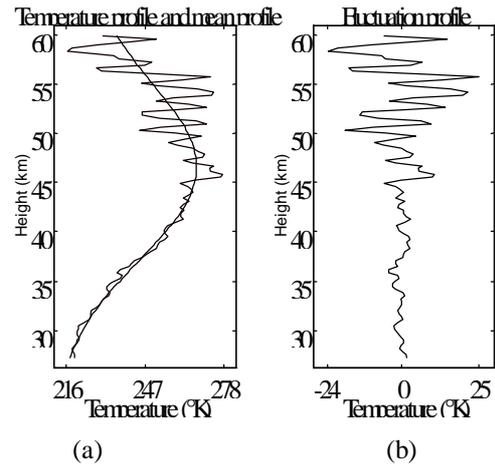


Figure 1 : Profils verticaux de température extraits des données Lidar moyennées pour la nuit du 21 Juin 1994.

(a) Profil initial et profil moyen de température (traits fin et gras).

(b) Profil de fluctuations de température obtenu par soustraction du profil moyen au profil initial.

4 Caractérisation des ondes dominantes

Dans un premier temps, on applique la transformée en ondelette continue de Morlet sur le profil vertical de fluctuation de température moyenné sur l'ensemble des fichiers d'une nuit de mesures. La figure 2 montre le diagramme altitude-longueur d'onde obtenu pour la nuit du 21 Juin 1994. Cette représentation révèle la distribution spatiale énergétique des différents événements dans les trois régions : la haute stratosphère (30-40 km), la stratopause (40-50 km) et la basse mésosphère (>60 km) identifiées sur le profil moyen de température (Figure 1). Deux structures dominantes sont alors observées dans les gammes de longueurs d'onde : 7-10 km et 2,4-5 km de 30 à 60 km d'altitude.

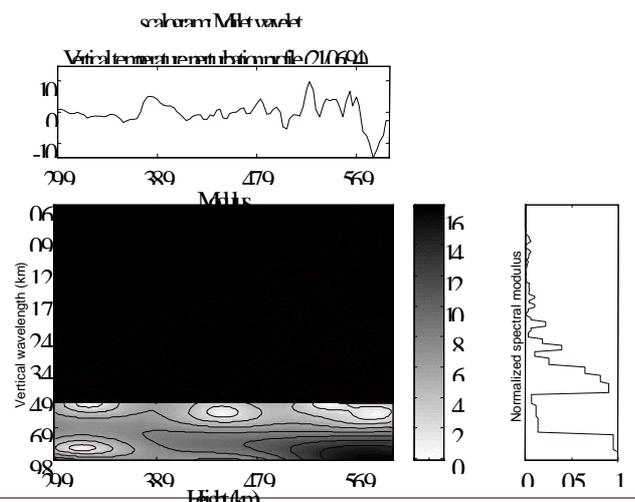


Figure 2 : Représentation altitude-longueur d'onde verticale par analyse continue en ondelette de Morlet pour la nuit du 21 Juin 1994. Deux structures dominantes sont observées dans les gammes de longueurs d'onde : 7-10 km et 2,4-5 km de 30 à 60 km d'altitude.

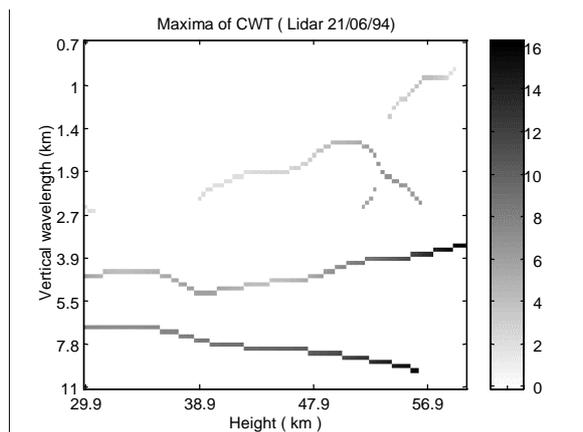


Figure 3 : Les lignes spectrales fournies par les maxima en module des coefficients en ondelette montrent l'évolution spatiale de 3 structures quasi-monochromatiques dominantes de longueurs d'onde verticales : 2, 4 et 7 km.

A partir de la transformée en ondelettes continue, on extrait les maxima locaux en utilisant un seuil. Les lignes spectrales renferment les informations essentielles du signal. La figure 3 montre la présence de 3 structures quasi-monochromatiques dominantes. Deux ondes de 4 et 7 km sont présentes sur l'ensemble du domaine étudié. Ces dernières sont stables en haute stratosphère (région relativement stable) et beaucoup moins au-delà de la zone de transition au niveau de la stratopause. A partir de cette zone, on observe une onde beaucoup plus courte de 2 km. Cette dernière suggère un phénomène de dissipation associé à la longueur d'onde verticale de 4 km dont l'intensité décroît à la stratopause.

La décomposition par l'analyse multirésolution permet l'extraction des différentes composantes du signal géophysique initial. Les différentes structures d'échelle sont successivement extraites par bandes d'octave. Chaque détail et approximation correspondent à une gamme de longueurs d'onde verticales. Les structures précédemment observées sont extraites des fichiers demi-heure. La figure 4 visualise un exemple de décomposition appliqué au 4^{ème} fichier demi-heure de la nuit du 24 juin 1994. Les détails d_2 (1,2-2,4 km), d_3 (2,4-4,8 km) et d_4 (4,8-9,6 km) font apparaître ces structures ondulatoires de longueurs d'onde verticales : 2 km dans la basse mésosphère, 4 km et 7 km sur l'ensemble du domaine étudié.

5 Estimation de la vitesse de phase

Nous présentons 3 méthodes pour évaluer la vitesse de phase sur ce type de signal :

- L'analyse multirésolution est appliquée sur l'ensemble des fichiers demi-heure obtenu pour une durée d'observation de 6 h dans le but d'étudier le comportement spatial et temporel de la longueur d'onde 7 km. La figure 5 montre l'évolution des maxima et minima d'amplitude visualisés en blanc et en noir. Cette évolution indique une progression de phase vers le bas au-delà de la stratopause (>45 km d'altitude). La vitesse de phase calculée à partir de la pente de la droite représentée est évaluée à -0,23 m/s.

- La phase peut être aussi directement obtenue à partir des coefficients en ondelettes. Nous utilisons la propriété de progressivité de l'ondelette de Morlet pour les structures monochromatiques. Ces dernières ont une progression de phase linéaire 2π périodique. En s'intéressant à une longueur d'onde particulière, on peut suivre l'évolution de la phase sur chaque fichier demi-heure. La figure 6 montre l'évolution de la phase de la longueur d'onde 6,6 km pour deux fichiers demi-heure (n°6 et n°9) séparés d'une durée de 1h30. La phase se décale progressivement vers le bas et la vitesse de phase est estimée à -0,25 m/s à la stratopause (à 47 km d'altitude) pour le cas étudié.

- La dernière méthode consiste à superposer la partie réelle des coefficients en ondelettes continues de la huitième dérivée de la gaussienne des diagrammes altitude-longueur d'onde successifs. On localise ainsi les maxima d'amplitude et on les identifie sur les différents fichiers dans le but de suivre leur progression temporelle et spatiale (Figure 7). Cette variation qui dépend de la stabilité de l'onde est convertie en vitesse de phase. L'application aux fichiers précédents nous donne un vitesse de phase de -0,26 m/s à la stratopause.

La première méthode fournit une vision globale de l'évolution d'une structure sur la nuit d'observation et de l'estimation de l'évolution de la vitesse de phase. La deuxième méthode est une façon rapide et simple d'évaluer la vitesse de phase sous la condition que la longueur d'onde étudiée varie peu. La dernière méthode tient compte de la variation de la longueur d'onde et est applicable lorsque les maxima sont identifiables. Elle pourrait permettre la distinction des structures à vitesse de phase négative et positive. Le choix des méthodes dépend en fait des caractéristiques des signaux traités.

6 Conclusion

Cette étude a présenté l'utilisation de différentes techniques issues de l'analyse en ondelettes appliquées à un signal géophysique. Ces techniques ont été développées sur des signaux émis par un LIDAR utilisé en physique de l'atmosphère. Dans le cas étudié, la transformée en ondelettes continue de Morlet pour laquelle on a déterminé les lignes spectrales a permis d'identifier et de localiser dans le signal étudié les structures ondulatoires d'échelle différente associées aux ondes de gravité. Ces dernières peuvent alors être extraites du signal géophysique par l'analyse multirésolution de façon à être étudiées séparément.

Par la suite, on a proposé 3 méthodes pour l'estimation d'un paramètre essentiel à la caractérisation des ondes de gravité : la vitesse de phase verticale. Celle-ci est négative et inférieure à 1m/s entre 30 à 60 km d'altitude.

Ces méthodes peuvent très facilement être étendues à d'autres domaines géophysiques ayant des signaux du même type : sonar, radar, réflectométrie... Les applications concernées sont celles qui ont des mesures quasi-instantanées et pour lesquelles on s'intéresse à l'évolution du signal en fonction de la distance.

7 Références

[1] Gonzalez N., "Ondes de gravité dans l'atmosphère moyenne : contributions à l'étude de leurs interactions avec la circulation générale", Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Juillet 1994.
 [2] Torrèsani B., "Analyse continue par ondelettes", Savoirs actuels, InterEditions/CNRS Editions, 1995.
 [3] Strang G. and Nguyen T., "Wavelets and filter banks", Wellesley-Cambridge Press, 1996.

[4] Daubechies I., "Ten lectures on wavelets", CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, 1992.
 [5] Molinaro F., Bencherif H. and Bessafi M., "Time-Frequency Analysis of LIDAR Signal to obtain Gravity Wave Characteristics", Trieste (Italy), EUSIPCO, September 1996.
 [6] Chane-Ming F., Molinaro F. et Leveau J., "Gravity wave activity in the southern intertropical middle atmosphere by wavelet analysis", First SPARC General Assembly Melbourne, oral paper, December 1996.

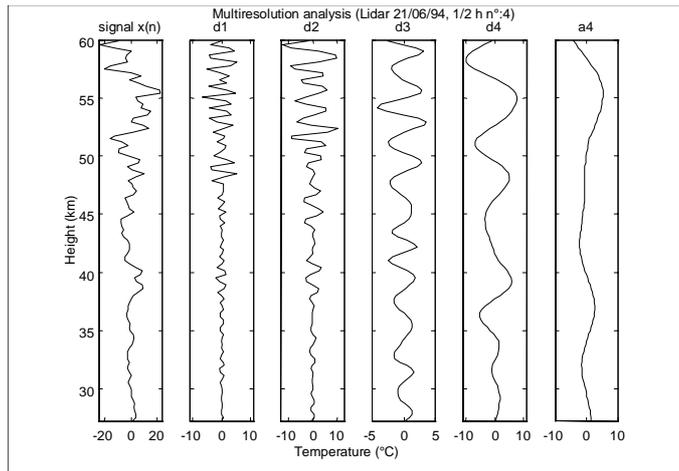


Figure 4 : Les ondes dominantes sont successivement extraites du signal de fluctuation de température par analyse multirésolution. ($d_1 = 0,6-1,2$ km, $d_2 = 1,2-2,4$ km, $d_3 = 2,4-4,8$ km, $d_4 = 4,8-9,6$ km, $a_4 > 9,6$ km). Les détails d_1 , d_3 et d_4 visualisent les structures ondulatoires de longueurs d'onde verticales : 2 km, 4 km et 7 km.

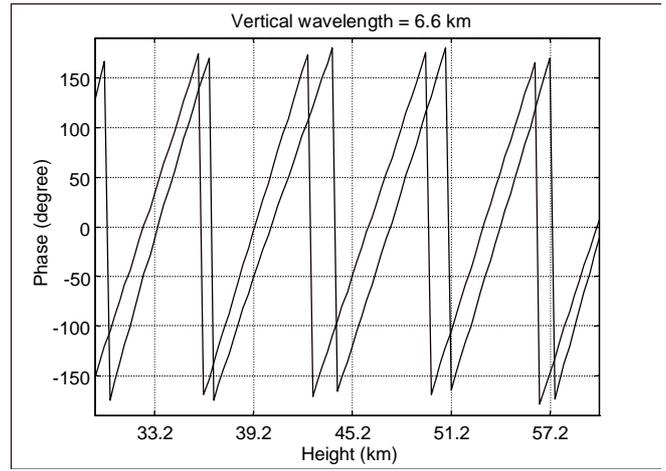


Figure 6 : La superposition de la phase donnée par les coefficients en ondelettes pour deux fichiers ($n^{\circ}9$ en gris et $n^{\circ}6$ en noir) réalisée pour la longueur d'onde 6,6 km donne une vitesse de phase de $-0,25$ m/s à la stratopause.

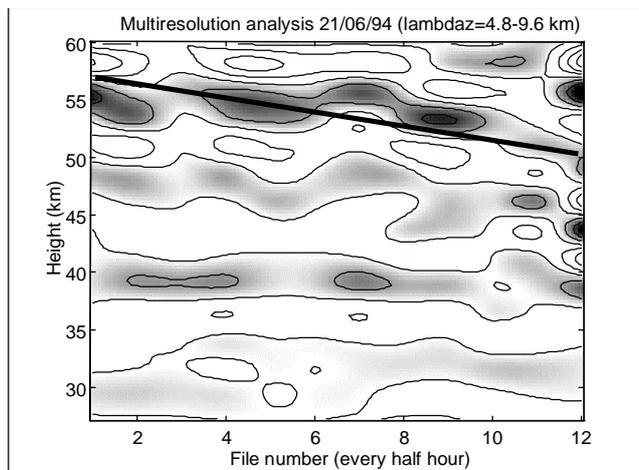


Figure 5 : L'évolution des maxima (en noir) et des minima (en blanc) pour l'amplitude de chaque composante de longueurs d'onde verticale 4,8-9,6 km est obtenue à partir de 12 profils successifs intégrés sur 30 min. Une vitesse de phase de $-0,23$ m/s (pente de la droite) est estimée dans la mésosphère pour la nuit de mesures du 21 Juin.

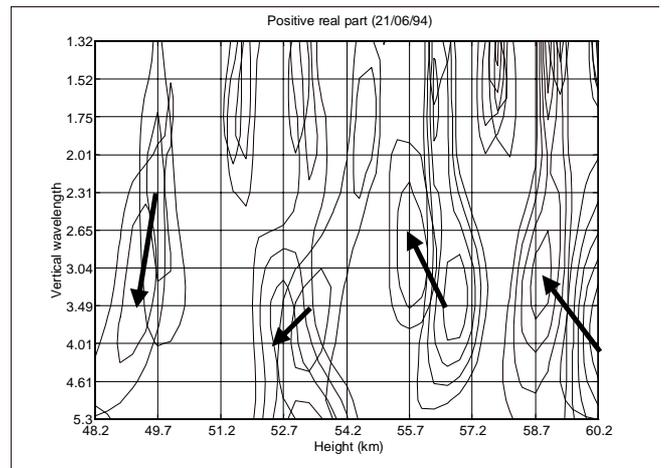


Figure 7 : La superposition des isocontours de la partie réelle de la transformée en ondelettes pour deux fichiers successifs permet de suivre l'évolution temporelle des maxima d'amplitude indiquée par les flèches. Cette variation permet d'obtenir la vitesse de phase soit $0,26$ m/s à la stratopause.