

# Analyse par Ondelettes et Méthodes Paramétriques en Météorologie : Application aux Mesures de Température par Télédétection Radio-Acoustique

Philippe GOUPIL<sup>1</sup>, Corinne MAILHES<sup>2</sup>, Vladislav KLAUS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Météo France, Centre National de Recherches Météorologiques. GMEI/STM  
42, Av. G. Coriolis, F-31057 Toulouse Cedex, France

<sup>2</sup>ENSEEIH/TESA  
2, rue Camichel, BP 7122, 31071 Toulouse Cedex 7, France

[goupil@cnrm.meteo.fr](mailto:goupil@cnrm.meteo.fr), [mailhes@len7.enseeiht.fr](mailto:mailhes@len7.enseeiht.fr), [Vladislav.KLAUS@meteo.fr](mailto:Vladislav.KLAUS@meteo.fr)

**Résumé** – Le système RASS, composé d'un radar météorologique et d'un dispositif acoustique, permet de mesurer simultanément la température de l'atmosphère à différentes hauteurs. Concrètement, pour chaque niveau d'altitude, on dispose d'un signal complexe dont on doit estimer le contenu spectral (fréquence Doppler) afin d'accéder à la température de l'air. Dans cet article, on montre que l'analyse spectrale habituellement utilisée par les météorologistes, basée sur la Transformée de Fourier, est inadaptée face à la non-stationnarité des signaux traités. Un traitement plus adapté est proposé, associant analyse par ondelettes et modélisation paramétrique. On montre sur des données réelles l'amélioration apportée en terme de portée du radar et de précision sur la mesure de la température.

**Abstract** – The RASS system allows to measure the temperature of the atmosphere at different successive altitudes, by combining radar and acoustic techniques. For each altitude level, a complex Doppler signal is recorded and the corresponding Doppler frequency is bound to the temperature. Usually, RASS data are processed using a classical Fourier analysis. In this paper, we propose to take into account the nature of the RASS signal in order to get better temperature estimates and to use a more adapted method than the Fourier Transform : a joint parametric and wavelet analysis.

## 1. Introduction

L'objectif de cet article est de montrer comment on peut améliorer la qualité des mesures de température obtenues par télédétection radio-acoustique (système RASS, combinaison d'un radar météorologique et d'un dispositif acoustique) en optimisant le traitement du signal. Dans la littérature, les corrections habituellement proposées reposent sur la variabilité des conditions météorologiques, mais ne prennent jamais en compte la nature des signaux à traiter.

La première partie de cet article décrit le principe de l'expérience RASS développée par le centre de recherches de Météo-France (CNRM, Toulouse) ainsi que la méthode de traitement du signal habituellement appliquée pour fournir les mesures de température. La seconde partie expose plus en détail la nature des signaux à traiter. On décrit ensuite, dans la troisième partie, le modèle développé pour simuler les signaux RASS, utilisé pour créer une base de signaux expertisés. La quatrième partie s'attache à montrer que la méthodologie employée par les météorologistes, basée sur des méthodes non paramétriques, n'est pas adaptée au type de signaux traités. Dans la partie suivante, on expose la méthode proposée. Un débruitage préliminaire des signaux par paquets d'ondelettes suivi d'une estimation de la fréquence Doppler par une méthode paramétrique de type modélisation AR permet d'améliorer la qualité des mesures en terme de biais et de portée en altitude des mesures. On

présente une application de cette méthode sur des données réelles.

## 2. Contexte de l'étude

Le dispositif RASS (Radio Acoustic Sounding System) est un système de télédétection radio-acoustique qui mesure des profils verticaux de température [1] en utilisant conjointement un radar Doppler à impulsions (dans notre cas le radar ST Insu\Météo VHF 45 MHz) et un dispositif acoustique. On émet des ondes sonores de différentes fréquences, à la verticale et à intervalles de temps réguliers. Ces ondes servent de réflecteurs artificiels pour les ondes radar. La mesure radar de la fréquence Doppler  $f_D$  du signal rétrodiffusé fournit la vitesse de l'onde sonore émise. On en déduit par une relation très simple la température :

$$T = (\lambda f_D / (2 * 20.047))^2 \quad (1)$$

L'échantillonnage dans le temps du signal rétrodiffusé provoque un échantillonnage en altitude. On dispose ainsi d'un ensemble de signaux complexes correspondant chacun à une couche atmosphérique donnée (appelée *porte*). Dans la configuration actuelle, on prélève un point toutes les 2.5 ms après chaque impulsion radar, soit une résolution spatiale de 375 m. Après traitement des données, on obtient ainsi une

mesure de température tous les 375 m, ce qui constitue le profil de température.

Du point de vue du traitement du signal, la méthodologie habituelle consiste à calculer le périodogramme des séries temporelles pour chaque altitude. On traite des séries complexes de 256 points correspondant à une étendue spectrale de 12.5 Hz. Un traitement par blocs permet de moyenner un certain nombre de spectres consécutifs afin de diminuer la variance du bruit (sommations incohérentes). Les spectres sont visualisés en temps réel en fonction des différentes altitudes des portes (Fig. 1). On distingue nettement la fréquence Doppler à estimer. Une fois le pic spectral de plus forte énergie isolé, on procède généralement à l'ajustement d'une gaussienne dont la valeur moyenne est la fréquence Doppler moyenne. On en déduit alors la température de l'atmosphère pour l'altitude considérée. Notons l'évolution de la fréquence d'une porte à l'autre, qui traduit l'évolution de la température en altitude. Rappelons que la température décroît avec l'altitude jusqu'à la "tropopause".

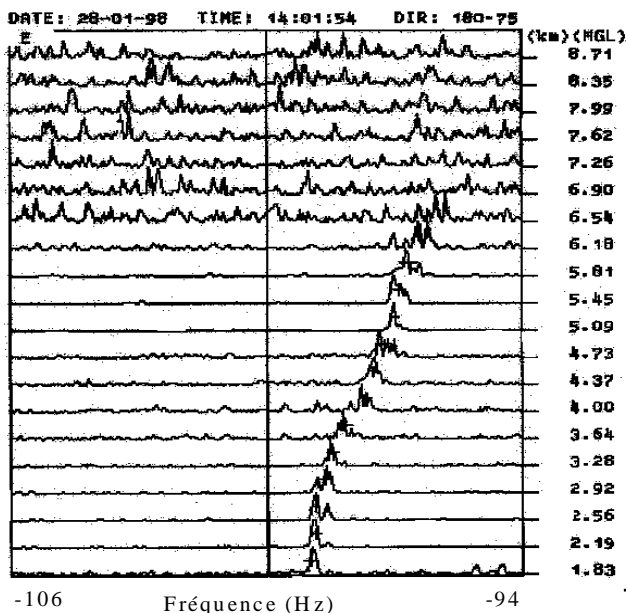


Fig. 1 : Tracé du périodogramme pour chaque altitude sondée (exprimée à droite en km).

### 3. Nature des signaux

Les signaux RASS se composent d'une succession de signaux transitoires indépendants noyés, en première approximation, dans un bruit blanc additif. La fréquence Doppler est contenue dans ces structures que l'on appelle des "échos RASS". On constate visuellement sur ces échos une forte modulation en amplitude (Fig. 2). Une analyse temps-fréquence (scalogramme, cf. Fig. 2) met en évidence une légère modulation en fréquence, puisque pour chaque écho on observe une évolution linéaire de la fréquence en fonction du temps. Cette première étude permet de conclure sur la non-stationnarité des signaux RASS.

Le niveau de bruit est différent suivant la hauteur considérée, variant généralement de -10 à +10 dB. On perd notamment toute trace du signal utile à partir d'une certaine altitude (Fig. 1).

Du point de vue du traitement du signal, nous sommes donc confrontés à un problème d'estimation de la fréquence Doppler sur des signaux non stationnaires, pour des SNR variables.

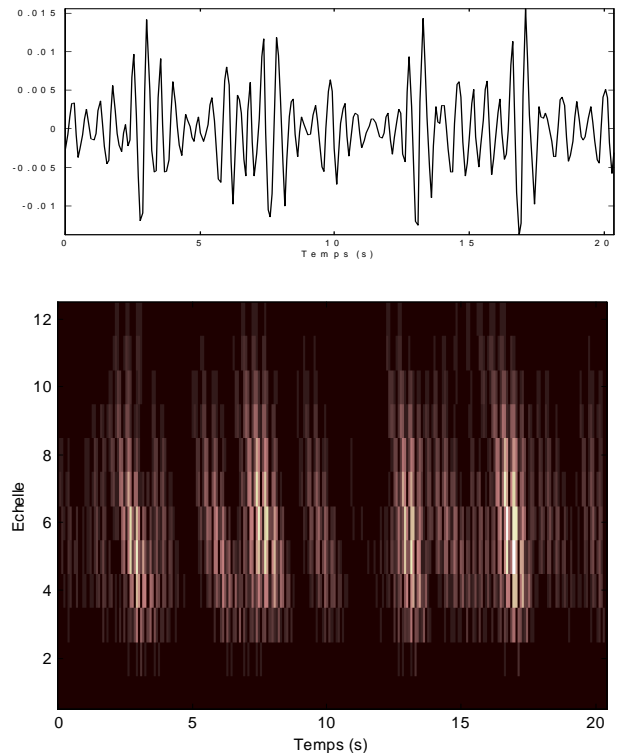


Fig. 2 : une série temporelle (256 points) en haut et le scalogramme associé en bas. On distingue nettement la signature de chaque écho.

### 4. Modélisation des signaux

On propose de modéliser le signal RASS  $y(t)$  de la façon suivante :  $y(t) = x(t) + b(t)$ , où  $b(t)$  est un bruit blanc gaussien et  $x(t)$  représente les échos RASS. On propose pour  $x(t)$  l'écriture suivante [3]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^M A_k \cdot P_k \cdot \exp(i\Omega(t)) \cdot U(t - t_k) \quad (2)$$

Les M échos sont positionnés par une fonction rectangle  $U$  centrée sur  $t_k$ . Ce sont des sinusoïdes complexes modulées en fréquence, et en amplitude par les deux termes  $A_k$  et  $P_k$  qui sont reliés aux paramètres de fonctionnement radar et acoustique ainsi qu'aux conditions climatiques. La modulation en fréquence est également déterminée par les conditions climatiques. A partir de conditions climatiques initiales données, nous avons pu, grâce à ce modèle, élaborer une base d'expertise en simulant un grand nombre de fois le même profil de température théorique.

## 5. Intérêt d'une nouvelle approche

Le traitement implanté par les météorologistes (périodogramme suivi d'un ajustement de gaussienne sur le pic de plus forte énergie) est inadapté à la nature des signaux traités, pour plusieurs raisons.

Les inconvénients sont ceux, bien connus, de tous les estimateurs basés sur la Transformée de Fourier (voir par exemple [4]). La Transformée de Fourier, outil stationnaire, est sous-optimale dans le traitement de signaux non-stationnaires. Sa résolution spectrale est limitée en  $1/N$ , où  $N$  est le nombre de points du signal traité. Des problèmes de variance sont limitatifs. On trouve aussi des problèmes de résistance au bruit, qui dans notre cas, limitent la portée en altitude de l'instrument.

Une fois le périodogramme calculé, il existe différentes méthodes pour estimer la fréquence Doppler (recherche du maximum, méthode des moments, etc.) Le traitement implanté au CNRM consiste à ajuster une gaussienne sur le pic de plus forte énergie. Cette méthode reste limitée dans le cas de fort bruit. En effet, pour des SNR faibles, on est amené à ajuster plusieurs gaussiennes sur le spectre. La difficulté est alors d'identifier la gaussienne représentative de la mesure de la température. On peut certes s'aider de la continuité du profil de température de porte en porte, mais lorsque le traitement identifie deux gaussiennes très proches l'une de l'autre, il devient très difficile de trancher.

On en conclut que le traitement utilisé jusqu'à présent est inadapté, car il ne tient pas compte de la nature du signal à traiter et limite les possibilités de l'instrument (voir [2] pour une mise en évidence de ce phénomène sur des données simulées et Fig. 4 et 5 ci-dessous pour des données réelles).

## 6. La méthode proposée

La méthodologie proposée procède en deux étapes. Dans un premier temps, l'objectif était d'étudier un éventuel prétraitement afin d'améliorer les performances de la technique classique (périodogramme et ajustement de gaussienne), qui a l'avantage d'être très simple algorithmiquement. Le problème de l'ajustement de gaussienne étant lié au niveau de bruit, le prétraitement doit permettre de débruiter le signal. L'algorithme proposé [3], comporte 3 étapes. Après décomposition du signal en paquets d'ondelettes jusqu'à un niveau de résolution fixé  $N$ , par bancs de filtres uniformes, on calcule dans chaque sous-bande un critère énergétique, fonction des  $n$  coefficients d'ondelettes  $C_i$ :

$$P = \sum_{i=1}^n |C_i|^2 \quad (3)$$

En moyennant les valeurs  $P$  ( $2^N$  valeurs pour une décomposition jusqu'au niveau  $N$ ) obtenues sur plusieurs tranches consécutives du signal (traitement par blocs), on diminue la variance des valeurs représentatives du bruit et on isole plus facilement les sous-bandes dans lesquelles se manifestent les transitoires. La dernière étape consiste à reconstruire le signal débruité.

Le traitement des données réelles révèle une amélioration en terme d'augmentation de la portée (mesure de la température à des hauteurs non atteintes par la technique de départ, Fig. 3).

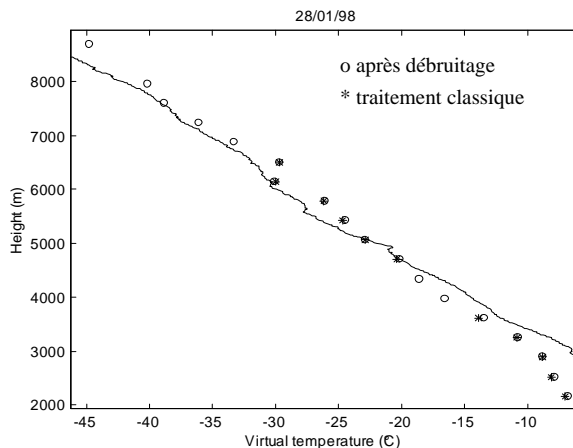


Fig. 3 : Comparaison des profils de température, avant et après débruitage par ondelettes, avec le profil réel (trait continu) obtenu par radiosondage. Données du 28/01/98, radar Insu/Météo, CNRM, Toulouse.

La deuxième étape doit permettre d'améliorer la résolution fréquentielle en vue d'augmenter la précision des mesures de température. Cette amélioration passe par l'abandon des méthodes non paramétriques utilisées jusqu'alors pour l'estimation de la fréquence Doppler. Etant donné la nature des signaux RASS et l'adéquation du modèle proposé (cf. §4), nous proposons d'appliquer une modélisation AR par la méthode des moindres carrés sur la corrélation du signal (AR LSMYW [4][5]). Le choix de l'ordre du modèle se fait grâce à l'étude du critère MDL (Minimum Description Length) [6]. L'étape préliminaire de débruitage rend performante cette technique classique d'analyse spectrale AR et permet d'éviter l'utilisation de techniques paramétriques plus évoluées et plus lourdes d'un point de vue calculatoire (SVD, Haute Résolution ...).

Nous avons choisi de comparer les deux méthodes, méthode classique (périodogramme + gaussienne) et méthode globale (ondelettes + modélisation paramétrique), sur des données réelles obtenues au CNRM, représentant 60 mn d'acquisition durant la journée du 16 décembre 1998. Aucune correction d'ordre météorologique n'a été effectuée, le but étant de montrer l'intérêt d'un traitement plus approprié des données. Nous disposons pour cette journée d'une mesure de référence très précise, c'est-à-dire une mesure de température par ballon-sonde (ou radiosondage). La sonde emportée par le ballon donne des mesures de température tous les 5 mètres. Afin d'éliminer les données erronées, un tri sélectif a été réalisé en posant le critère qualitatif suivant : toute mesure de température présentant un écart en valeur absolue de plus de 5 degrés Celsius avec la référence est écartée et sera représentée par un blanc. Les figures 4 et 5 représentent la température mesurée en

fonction du temps et de l'altitude. On distingue clairement les améliorations apportées par la méthode proposée en terme de portée du radar et de détectabilité des signaux. Un moyen efficace de quantifier cette amélioration est d'estimer ce que les météorologistes appellent la *sensibilité* du radar (pourcentage de données non erronées). Dans le cas du traitement par périodogramme la sensibilité est ici de 61%. Elle passe à 80% après traitement par la méthode proposée.

La connaissance de la mesure par radiosondage a aussi permis de mesurer le biais dans les deux cas (Fig. 6). Le gain en terme de précision sur la mesure de la température est relativement bon, puisque 8 mesures de température présentent un biais plus faible avec la nouvelle méthode, sur les 11 portes communes (aucune mesure n'était disponible pour l'altitude la plus élevée avec le traitement classique).

## 7. Conclusion

Le couplage original des méthodes par ondelettes et des méthodes paramétriques pour le traitement des signaux RASS se révèle performant, permettant d'augmenter la sensibilité, la portée et la précision du système RASS. L'utilisation du RASS dans des campagnes internationales de mesures (expérience MAP, et installation du RASS en Terre Adélie, Antarctique, pour l'étude du climat polaire) devrait être l'occasion de tester cette méthode sur un grand volume de données et de procéder à des études climatiques. Pour la partie traitement du signal, des améliorations sont certainement possibles en s'orientant vers des techniques de débruitage adapté (*best basis*) suivi d'une estimation spectrale directement dans les sous-bandes.

**Remerciements :** nous remercions Guy Chérel et Roger Durbe (CNRM/SC/LEM) pour le développement du système RASS au CNRM, sans qui ce travail ne serait pas possible.

## Références

- [1] G., Dubosclard, T., Ouazzani Touhami, J., Fournet-Fayard, Y.B., Pointin. Les sondages radioacoustiques de l'atmosphère. *La Météorologie 8<sup>e</sup> série*, n°18, 34-48, 1997.
- [2] P., Goupil, C. Mailhes, V., Klaus. RASS time series parametric modeling : a way to overcome the classical Fourier Transform. Soumis à *Physics and Chemistry of the Earth*.
- [3] P., Goupil, V., Klaus, G., Chérel, R., Durbe. On the use of the wavelet-packet transform to improve the measurement of the RASS temperature profiles. *Proc. 9<sup>th</sup> ISARS, Vienna*, 76-79, 1998.
- [4] S.M., Kay. *Modern Spectral Estimation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.
- [5] A., Ducasse, C., Mailhes, F., Castanié. Estimation de fréquences : panorama des méthodes paramétriques. *Traitement du Signal*, Vol. 15, n°2, 149-162, 1998.
- [6] J., Rissanen. A universal prior for the integers and estimation by minimum description length. *Ann. Stat.*, Vol. 11, 417-431, 1983.

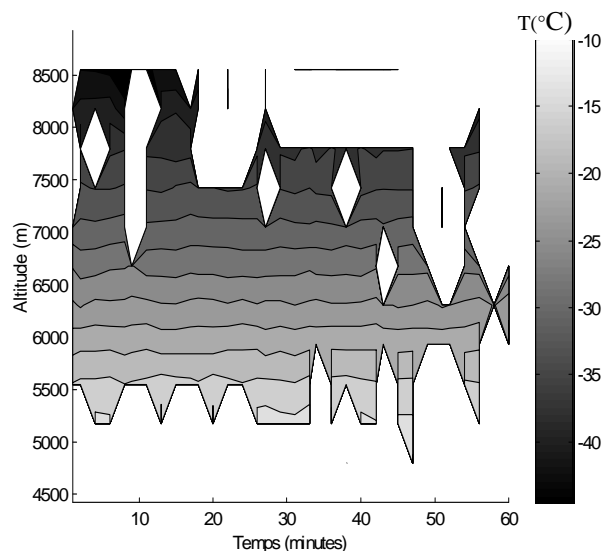


Fig. 4 : Profil de température obtenu après ajustement de gaussienne sur le périodogramme.

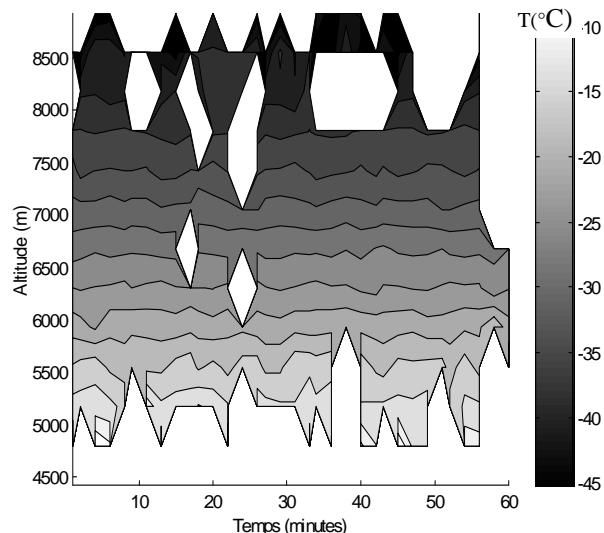


Fig. 5 : Profil de température obtenu après estimation spectrale par modélisation AR sur les signaux débruités.

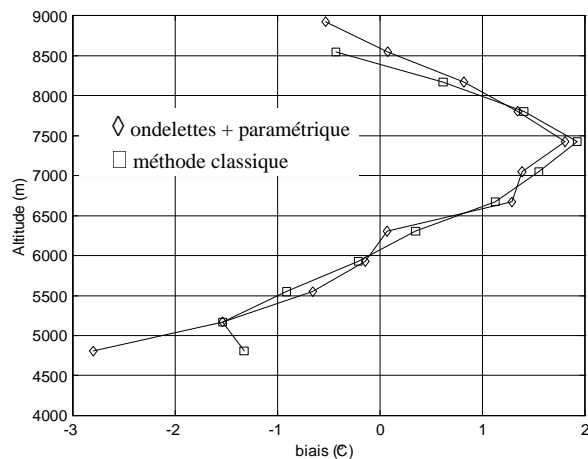


Fig. 6 : comparaison du biais des 2 méthodes.