

# La Décomposition Modale Empirique à la recherche de l'Onde Circumpolaire Antarctique

Sylvie ROQUES<sup>1</sup>, Frédérique RÉMY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Astrophysique

Observatoire Midi-Pyrénées, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

Observatoire Midi-Pyrénées, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

sylvie.roques@obs-mip.fr, frederique.remy@notos.cst.cnes.fr

**Résumé** – Nous présentons une application de la Décomposition Modale Empirique (EMD) à la détection de l'onde circumpolaire Antarctique (OCA), une des manifestations les plus marquantes de la variabilité australe. Cette variabilité est analysée à partir de relevés de stations de météorologie côtières du continent Antarctique, fournissant des données de température depuis 1955. Grâce à l'EMD couplée à une analyse par ondelettes, l'OCA est ainsi détectée pour la première fois au sol. Celle-ci n'avait été observée jusqu'à présent que dans l'atmosphère, l'océan et les glaces de mer du système austral, mais sa présence sur le continent Antarctique lui-même n'avait encore jamais été décelée.

**Abstract** – We present an application of the Empirical Mode Decomposition (EMD) to the detection of the Antarctic circumpolar wave (ACW), one of the strongest demonstration of the Southern variability. This variability is analyzed from data of meteorological coastal stations of the Antarctica continent providing temperature time-series since 1955. Thanks to EMD associated to a wavelet analysis, the ACW is detected for the first time on the ground. Until now, it had been observed only in the atmosphere, the ocean and the freshwater ices of Southern system, but its presence on the continent Antarctica itself had never been revealed.

## 1 Contexte général

Les différents couplages qui lient l'Antarctique, le système austral (atmosphère, océan et glace de mer) et les plus hautes latitudes doivent être mieux compris pour mener des études réalistes sur le changement climatique global de notre planète à long terme. L'analyse des données regroupant l'évolution de paramètres physiques (pression atmosphérique, température, vitesse du vent, etc.) et leur interprétation en termes de réchauffement climatique et de variation du niveau de la mer sont donc capitales pour mieux contraindre les différents couplages contrôlant la climatologie australe et mieux décrire la variabilité naturelle de l'Antarctique [1]. Toutefois, ces couplages sont encore mal connus et mal décrits. En effet, ils sont difficiles à identifier car leurs échelles de temps sont relativement longues comparativement à la durée des observations existantes.

L'onde circumpolaire Antarctique (OCA) est l'une des manifestations les plus marquantes de la variabilité australe. On sait déjà que cette onde tourne autour de l'Antarctique en 8 à 10 ans. On sait qu'elle affecte au moins l'étendue des glaces de mer, la pression atmosphérique, la température, la salinité et les vents de l'océan austral [2-3]. Mais elle n'est pas perceptible sur le continent lui-même et pratiquement aucune étude n'existe sur le sujet, si bien qu'il reste impossible de connaître le rôle primordial du continent Antarctique dans la variabilité climatique. Une des raisons est qu'il n'y a pas, sur le continent, d'équivalent des différentes données (par exemple de température de

surface) disponibles sur l'océan de façon globale depuis les années 1980. Par ailleurs, les modèles météorologiques sont beaucoup moins bien contraints sur le continent et la variabilité naturelle y est extrêmement plus forte.

En ce qui concerne les observations sur le continent lui-même, les séries temporelles issues des satellites ne commencent qu'avec le lancement d'ERS 1 en 1991 et sont donc trop courtes face aux échelles de temps des fluctuations naturelles du climat polaire. C'est pourquoi notre objectif est d'essayer de décrire la variabilité de la météorologie Antarctique à partir des données "au sol" les plus longues qui existent à ce jour. Il s'agit des relevés de température d'une douzaine de stations météorologiques côtières réparties de façon relativement régulière autour du continent Antactique et qui fournissant des données de température depuis 1955 (voir Fig. 1 pour un exemple). Celles-ci, obtenues dans un environnement difficile, sont bruitées et montrent essentiellement un très fort signal saisonnier.

Ainsi, la recherche d'un signal extrêmement faible, signature de l'onde circumpolaire Antarctique, obtenu par différentes stations avec différents rapports signal sur bruit, perdu dans de fortes composantes saisonnières et inter-saisonnières, nécessite une analyse par des méthodes de traitement multi-échelle pour être décelé.

Nous montrerons comment une décomposition modale empirique associée à une analyse par ondelettes des modes pertinents, permet de détecter la présence cette onde sur le continent Antarctique, et de caractériser sa rotation.

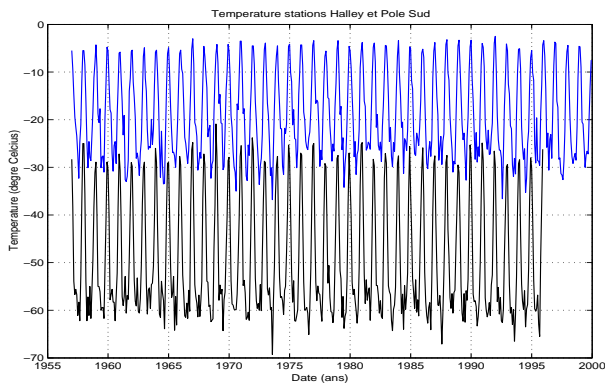


FIG. 1 – Variations de température sur les stations de Halley (courbe du haut) et du Pôle Sud (courbe du bas). On remarque la très forte variabilité saisonnière et inter-saisonnière, l’instabilité des hivers plus forte qu’en été et le fait que les hivers sont plus longs que les étés, ce qui constitue notamment une limitation à l’analyse de Fourier.

## 2 Différentes approches

Jusqu’à présent, les approches utilisées pour étudier la richesse de ces signaux au sol ont reposé sur des études statistiques et des analyses de covariance menées par les glaciologues. Sauf pour quelques stations, il est déjà possible de détecter très légèrement une onde à 4 ans. On peut également montrer que des stations proches ont un comportement similaire. Toutefois, il n’a pas été possible de détecter la moindre “onde tournante”. Même une analyse en composantes principales n’apporte pas d’information supplémentaire significative. Les résultats les plus probants que nous avons initialement pu mettre en évidence reposent sur une analyse en poursuite adaptée ou *matching pursuit* [4].

La Figure 2 illustre cette décomposition sur les données de la station de Halley. Le résultat présenté est le seul ayant permis de déceler une composante “à 8 ans”. Aucune des autres stations ne peut le mettre en évidence. Cette composante apparaît relativement loin dans la décomposition hiérarchique (atome numéro 97) et correspond à une énergie environ 100 fois plus faible que celle représentant les variations saisonnières (qui elles sont bien visibles), c’est-à-dire presque au niveau du bruit. Une des raisons est qu’il n’y a pas, dans la famille de fonctions utilisée pour la décomposition, une forme d’onde adaptée à un signal de si faible énergie. C’est la raison pour laquelle il apparaît la nécessité d’une décomposition multi-échelle qui soit réellement adaptative pour mettre en évidence l’onde recherchée.

## 3 Décomposition modale empirique

Ceci nous a conduit à nous intéresser à des décompositions temps-échelle plus adaptées au signal. Huang et al. (1998) ont récemment introduit une technique de décomposition adaptative d’un signal non stationnaire, la décomposition modale empirique (EMD), permettant une décomposition sur une base de fonctions non-linéaires extraite du signal lui-même. Le principe est d’identifier ité-

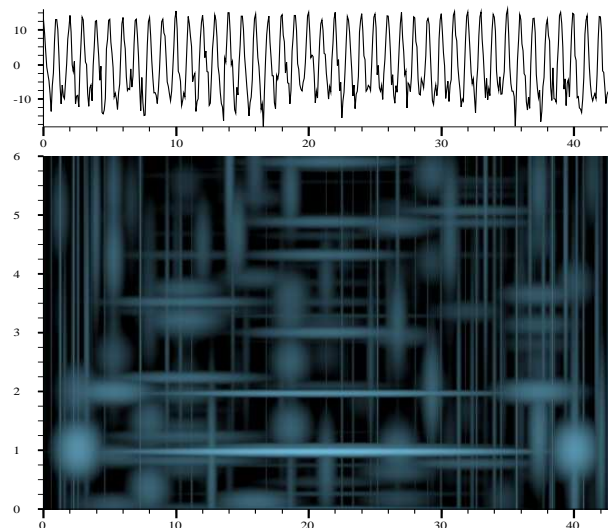


FIG. 2 – Décomposition en poursuite adaptée (en bas) des données de température de la station de Halley (en haut). Par projections successives du signal sur les éléments de base d’un dictionnaire de fonctions oscillantes, à chaque pas une information est encodée et permet une représentation concise des vibrations élémentaires contenues dans le signal. Abscisses : temps en an. Ordonnées : fréquence en  $\text{an}^{-1}$ . Les variations saisonnières sont bien visibles ainsi qu’une oscillation à 8 ans non concluante (un des derniers atomes parmi 100), qui apparaît en bas du diagramme, centrée sur l’échantillon 16 et de durée de vie d’environ 7 ans

rativement des modes intrinsèques en séparant à l’échelle d’une oscillation des contributions de plus en plus lentes. L’approche algorithmique consiste à construire pas à pas une base de fonctions (d’amplitudes et de fréquences variables, mais globalement de plus en plus basses-fréquences) présentant un certain nombre de propriétés remarquables, puisqu’elle amène à une décomposition complète, locale, adaptative et presque orthogonale (le degré de non orthogonalité pouvant être quantifié).

Dans le principe, il faut identifier les échelles de temps révélant des caractéristiques physiques du signal étudié, et de le décomposer en des “modalités intrinsèques” (ou modes) par un procédé de “tamisage” isolant les différents régimes. On peut montrer que la méthode proposée s’apparente à un filtrage non-linéaire dépendant du temps et auto-adaptatif [6]. De nombreux auteurs soulignent toutefois la nécessité de disposer d’une véritable compréhension théorique évitant de recourir à des simulations extensives. En effet, à ce jour, cette décomposition, comme son nom l’indique, n’est définie que par l’algorithme permettant de la mettre en œuvre et n’a quasiment pas fait l’objet de développements théoriques.

Sur le plan pratique, le signal étant donné, une enveloppe supérieure et une enveloppe inférieure sont construites en ajustant par des fonctions splines cubiques les maxima et les minima locaux du signal. Leur moyenne étant ensuite soustraite au signal, on obtient un résidu sur lequel la procédure (repérage des extrema, calcul de enveloppes, soustraction de la moyenne) va être ré-itérée. Pour que les résidus successifs obtenus soient des moda-

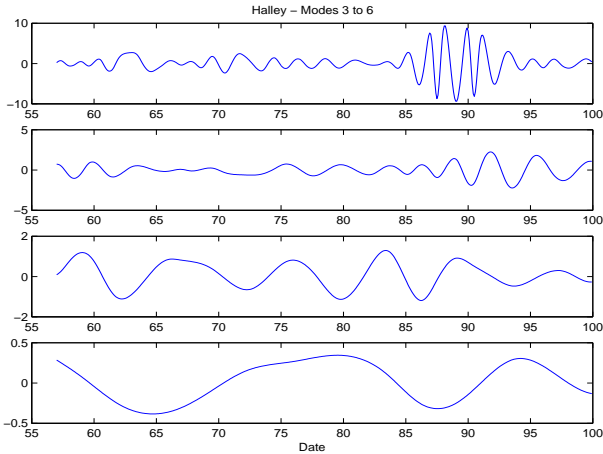


FIG. 3 – En descendant : troisième à sixième modes intrinsèques du signal. Abscisses : années. Ordonnées : amplitude de variation autour de la moyenne.

lités intrinsèques du signal, deux conditions doivent être remplies : le nombre d’extrema et le nombre de passages par zéro des résidus doivent différer au plus de 1, et à tout instant, la valeur moyenne entre l’enveloppe supérieure et l’enveloppe inférieure doit être nulle. Si ces conditions sont toujours vérifiées au premier itéré, ce n’est plus le cas par la suite, et l’algorithme simple que nous venons de décrire doit en pratique être raffiné par un processus de “tamisage” conduisant à la satisfaction des ces deux conditions. Cet algorithme technique et simple à mettre en œuvre est décrit par exemple dans [6].

## 4 Résultats

Nous avons appliqué une EMD sur les signaux de l’ensemble des stations. On obtient alors autant de décompositions sous forme de modalités intrinsèques. Pour se fixer les idées, une partie de la décomposition modale empirique de la série de température de la station britannique Halley est représentée sur la figure 3. Ce sont les modes 3 à 6 de la décomposition. Leur interprétation est immédiate : le troisième est caractéristique des influences océaniques. Le quatrième est le cycle quasi-quadrannal observé également dans les données océanographiques spatiales. Ces deux modes sont très énergétiques et peuvent probablement être à mêmes d’affecter l’analyse des tendances issues des données des satellites. Le cinquième mode est un cycle à 8 ans, caractéristique de l’onde circumpolaire Antarctique, et sur lequel nous allons revenir. Le sixième représente une tendance à long terme. Les modes non représentés correspondent aux perturbations météorologiques quasi-mensuelles et aux cycles saisonniers.

Pour les données de toutes les stations, les résultats obtenus sont similaires à ceux présentés sur la Figure 3. Le mode 5 est caractéristique d’une onde non-stationnaire à 8 ans, ou le mode 4 dans quelques rares cas (signalons que l’onde circumpolaire Antarctique présente deux minima et deux maxima et tourne en 8 ans, si bien qu’en un lieu sa périodicité apparente est de 4 ans).

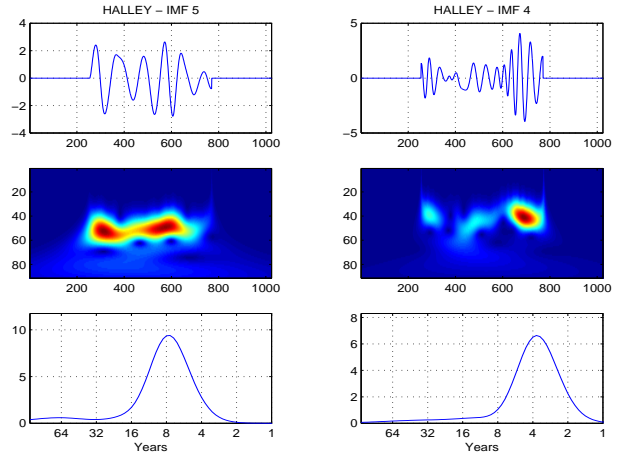


FIG. 4 – Étude des modes intrinsèques 4 et 5 de la station Halley. En haut : représentation des modes ; au milieu : transformées en ondelettes des modes ; en bas ; spectre global en ondelettes. L’analyse des résultats fait bien apparaître les périodicités attendues à 4 ans et 8 ans.

## 5 Couplage avec les ondelettes

En complément de cette analyse, les modes 5 (à 8 ans) et 4 (à 4 ans) issues de toutes les stations ont été décomposés sur une base d’ondelettes de Morlet [7] comme on peut le voir sur la Figure 4 pour la station Halley. L’objectif de cette nouvelle opération est double : déterminer un spectre global d’ondelettes pour chaque mode, donnant accès à une fréquence “moyenne”, et analyser les phases de cette transformée afin de détecter une onde tournante. En effet, l’avantage de la décomposition modale empirique résidant simplement (mais fondamentalement) dans sa capacité à déployer le signal original sur des bandes de fréquence pertinentes, passer chacune de ces modalités au crible d’une analyse par ondelettes nous permettra de comprendre la répartition en énergie des modes, leur modulation et leur évolution.

En ce qui concerne les amplitudes (et on peut se référer pour cela à la Figure 4) l’idée est tout simplement d’étudier la médiane des spectres d’ondelettes des modes 5 de toutes les stations. Le spectre d’ondelettes présente par construction, contrairement à la transformée de Fourier, une résolution accrue en basse fréquence, ce qui conduit à une meilleure précision pour localiser la fréquence d’un phénomène à grande échelle. La Figure 5 présente le résultat ainsi obtenu où l’onde à 8 ans est parfaitement identifiée. L’onde à 4 ans l’est également sur la médiane des modes 4 (rappelons la périodicité apparente de 4 ans de l’OCA).

Si l’on s’intéresse à présent aux phases des phénomènes, dans le but de repérer une onde tournante, la caractérisation des phases instantanées des modes peut s’effectuer facilement. Sur la Figure 6, les phases instantanées des modes 5 de toutes les stations sont représentées après une interpolation linéaire. Le résultat confirme bien l’idée d’une onde tournante, puisque ces phases correspondent bien à la fois à la vitesse d’une onde à 8 ans et à la position géographique de chaque station. Afin de confirmer ce résultat, l’idée simple que nous avons mise en œuvre a consisté à

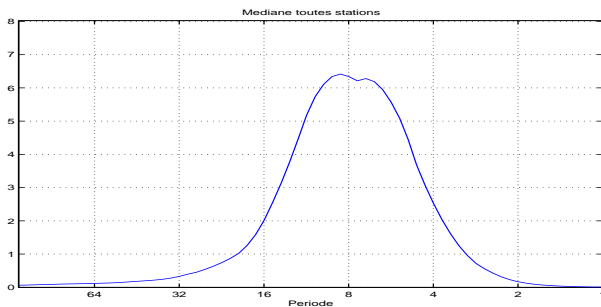


FIG. 5 – Médiane des spectres globaux d’ondelettes obtenus sur l’ensemble des stations de l’Antarctique (identiques à ceux représentés Fig. 4 en bas). Abscisse : période en an. Ordonnées : amplitude normalisée.

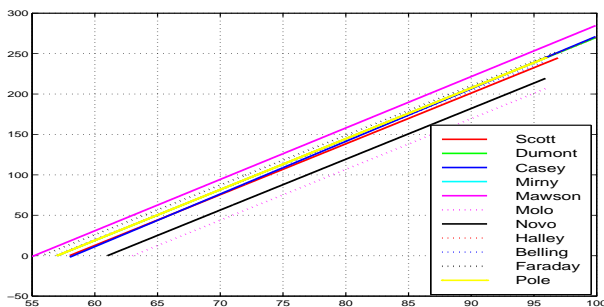


FIG. 6 – Phases des modes 5 (à 8 ans). Abscisse : date mod. 1900. Ordonnées : phase “déroulée” (non-mod.  $2\pi$ ).

étudier la phase de la transformée en ondelettes du mode pertinent en la considérant à la longitude de la station ayant observé le signal ayant conduit à ce mode. La Figure 7 illustre cette idée. La succession des maxima et des minima confirme bien le fait que l’onde circumpolaire Antarctique tourne, et la pente d’une droite imaginaire reliant chaque maximum (ou minimum) pour chaque station donne facilement la vitesse de rotation.

## 6 Conclusion

Nous avons pu identifier, grâce à la décomposition modale empirique, un mode à 8 ans sur les données des stations météorologiques de l’Antarctique. Un spectre global d’ondelettes a permis d’en mesurer les caractéristiques moyennes, et la phase de la décomposition en ondelette des modes pertinents a conduit également à la confirmation qu’il s’agit bien d’une onde tournante.

Ainsi, d’après ces travaux préliminaires, il semble bien que l’onde circumpolaire Antarctique soit bien détectable sur le continent à partir de ces données et avec la méthodologie employée. Il semble aussi que la confiance en celle-ci puisse nous permettre d’affirmer que l’onde est plus particulièrement perceptible dans certains secteurs côtiers de l’Antarctique et nous donne ainsi des indices pour mieux en comprendre la propagation et la cause. Pour plus de détails, on pourra se référer à [8].

Beaucoup de travail reste encore à réaliser sur les relations entre phases pour comprendre comment se déplace ce signal. En particulier, les phases présentées sur la Fi-

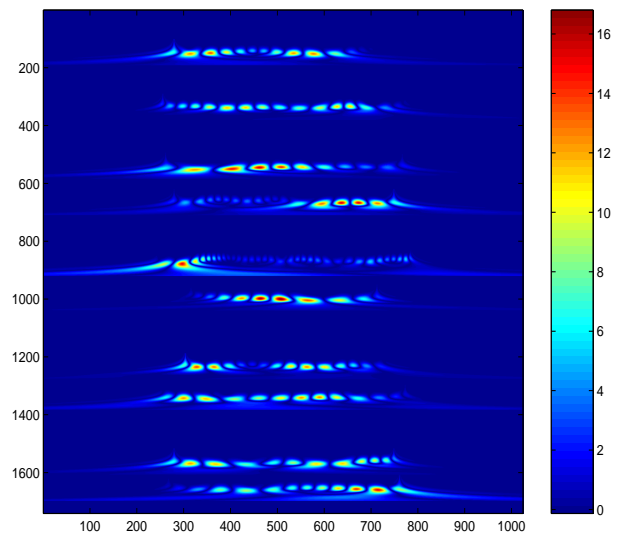


FIG. 7 – Phases des transformées en ondelettes des modes 5 (à 8 ans) recalées en longitude. Abscisse : échantillonnage en mois. Ordonnées : dixièmes de degrés de longitude.

gure 6 ont subi un ajustement linéaire. Leur caractère non-linéaire suggérerait que le centre de cette onde tournante se déplacerait également sur le continent. Le mouvement de l’onde ne serait donc pas circulaire mais de type cycloïdal. La réponse à cette question nécessitera un certain nombre de simulations numériques et une modélisation.

On observe également sur certaines stations une modulation qui pourrait correspondre à ce que les océanographes observent [2-3]. Il faudra en rechercher les causes dans la situation géographique de celles-ci, qui peuvent être situées dans des zones où les interactions entre l’océan austral et le continent sont plus intenses qu’ailleurs. Cela peut constituer une piste pour comprendre certains des mécanismes climatiques de la région.

## Références

- [1] Rémy F., Testut L. and Legresy B., *Climate Dynamics*, 19, 267-276, 2002.
- [2] Connolley, W.M., *J. of Geophys. Res.*, 108 (C4), 3-1,3-12, 2003.
- [3] White, W. B. and R.G. Peterson, *Nature*, 380, 699-702, 1996.
- [4] Mallat S. and Zhang Z., *IEEE Trans. Signal Process.*, 41(12), p. 3397, 1993.
- [5] Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih E.H., Zheng Q., Tung C.C. and Liu H.H., *Proceedings of the Royal Society of London, A*, v. 454, 903-995, 1998.
- [6] Magrin-Chagnolleau I. and Baraniuk R.G., *Proceedings of the 69th SEG Meeting*, Houston, Texas, USA, 1999.
- [7] Torrence C. and G.P. Compo, *A Practical Guide to Wavelet Analysis*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 61-78, 1998.
- [8] Roques S. et Rémy F., à paraître dans *Ann. Fac. Sci. Toulouse Math.*, 2005.