

# Caractérisation des Fonds Marins par Décomposition Modale Empirique

Abdel-Ouahab BOUDRAA, Claire POLLET, Jean-Christophe CEXUS et Zineb SAIDI

IRENav, Ecole Navale/E<sup>3</sup>I<sup>2</sup>, (EA 3876) ENSIETA  
Ecole Navale, Lanvéoc-Poulmic, BP600, 29240 Brest-Armées, France  
{boudra,pollet,cexus,saidi}@ecole-navale.fr

**Résumé** – Dans cet article, on s’intéresse au problème de la caractérisation des fonds marins à partir de profils bathymétriques. Les fonds marins sont considérés comme une superposition d’ondulations de sables (oscillations) de différentes hauteurs et longueurs d’ondes (dunes, rides, ...) dont la séparation est une étape importante en exploration géologique et géophysique. Pour séparer les différentes ondulations nous proposons une analyse multirésolution, de type ”ondelettes”, basée sur une technique récente : la Décomposition Modale Empirique. Cette approche considère les signaux (profils bathymétriques) à l’échelle de leurs oscillations locales. La méthode est testée sur des images simulées et réelles.

**Abstract** – The aim of this work is the characterization of seafloor using bathymetric profiles. Seafloor may be viewed as a superposition of fast oscillations (sand waves) superimposed to slow oscillations (ripples) and their separation is an important step in geophysical and geological exploration. To separate these oscillations a multiresolution approach, seen as a type of wavelet decomposition, based on a recent technique, referred to as Empirical Mode Decomposition (EMD) is proposed. This method considers bathymetric profiles at the scale of their local oscillations. The method is tested on simulated and real images.

## 1 Introduction

La forme des fonds marins est variée et liée à la nature des fonds (sédiments non cohésifs tels que sables, graviers) et à leur environnement (présence de courants marins et/ou de houle littorale entraînant mise en suspension, transport sédimentaire, dépôt et pavage) [1]. L’identification des profils bathymétriques peut donc être une aide à la caractérisation des fonds marins. C’est un problème spatial multi-échelles. Ainsi un profil bathymétrique peut être vu comme la superposition de différentes ondulations allant des oscillations rapides (rides) aux oscillations lentes (dunes). Comme chaque ondulation correspond à une gamme de fréquences, une approche possible pour séparer un profil bathymétrique en oscillations est d’utiliser une décomposition en sous-bandes. Récemment Huang et al. [2] ont introduit une méthode de décomposition en sous-bandes, locale et auto-adaptative pour l’analyse des signaux non stationnaires appelée Décomposition Modale Empirique (DEM ou EMD pour Empirical Mode Decomposition). L’EMD est entièrement pilotée par les données et, contrairement à la transformée de Fourier ou aux ondelettes, cette décomposition ne repose sur aucune famille de fonctions (ondelette mère) définie a priori. L’EMD peut être vue comme l’équivalent de l’analyse en composantes principales mais dédiée aux signaux non stationnaires. Tout signal peut être décomposé en une somme d’un nombre fini de composantes, type AM-FM, appelées modes ou IMF’s (pour Intrinsic Mode Function). Un mode est une IMF si sa moyenne est nulle et si les nombres de ses maxima et de ses minima sont les mêmes ou différents de un. L’EMD n’a pas de base théorique mais est uniquement

définie par un algorithme dit de tamisage (sifting process). Le tamisage d’un signal est réalisé en deux étapes : (i) la détection des extrema du signal et (ii) l’interpolation par ces extrema<sup>1</sup>.

## 2 Processus du Tamisage

L’EMD est défini par un processus dit de tamisage (sifting process) dont les étapes sont données par le pseudo-code suivant:

**Algorithme de Tamisage**

**Etape 1)** Fixer le seuil  $\epsilon$ ,  $j \leftarrow 1$  ( $j^{eme}$  IMF)

**Etape 2)**  $r_{j-1}(t) \leftarrow x(t)$  (résidu)

**Etape 3)** Extraire l’IMF :

- (a)  $h_{j,i-1}(t) \leftarrow r_{j-1}(t)$ ,  $i \leftarrow 1$  ( $i$  nombre de tamisage)
- (b) Identifier les extrema locaux de  $h_{j,i-1}(t)$
- (c) Calculer l’enveloppe supérieure  $U_{j,i-1}(t)$  et l’enveloppe inférieure  $L_{j,i-1}(t)$  par interpolation (splines cubiques) de  $h_{j,i-1}(t)$
- (d) Calculer la moyenne des enveloppes :  
$$\mu_{j,i-1}(t) \leftarrow (U_{j,i-1}(t) + L_{j,i-1}(t))/2$$
- (e) Mise à jour :  $h_{j,i}(t) \leftarrow h_{j,i-1}(t) - \mu_{j,i-1}(t)$ ,  $i \leftarrow i + 1$
- (f) Calculer le critère d’arrêt :

$$SD(i) = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{j,i-1}(t) - h_{j,i}(t)|^2}{(h_{j,i-1}(t))^2}$$

- (g) Décision : Répéter (b)-(f) jusqu’à ce que  $SD(i) < \epsilon$  et affecter  $IMF_j(t) \leftarrow h_{j,i}(t)$  ( $j^{eme}$  IMF)

<sup>1</sup>Ce travail est financé par le CPER, piloté par l’Ifremer, Contrat No. 03/2 210 614, Volet: Détection et caractérisation des fonds marins.

**Etape 4)** Mise à jour résidu :  $r_j(t) \leftarrow r_{j-1}(t) - IMF_j(t)$

**Etape 5)** Répéter l'étape 3 avec  $j \leftarrow j + 1$

jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'extrema de  $r_j(t)$

où  $T$  est la durée du signal et " $\leftarrow$ " est l'opération d'affectation. Le tamisage est répété plusieurs fois ( $i$  fois) jusqu'à ce que  $h$  soit une IMF vérifiant les conditions: C1) chaque mode a le même nombre (à un près) de passage par zéro et d'extrema; C2) la moyenne des enveloppes supérieures et inférieures des modes est nulle. Le résultat du tamisage conduit à une représentation du type :

$$x(t) = \sum_{j=1}^N IMF_j(t) + r_N(t) \quad (1)$$

$N$  est le nombre de mode trouvé. En pratique le critère d'arrêt,  $SD$ , est compris entre 0.2 et 0.3. Notons que l'EMD ne nécessite pas de pré-traitement. La méthode est entièrement pilotée par les données.

### 3 Simulation de Profils Bathymétriques

Nous avons simulé des profils bathymétriques représentant le fond de la mer afin de tester par la suite, sur ces signaux connus proches de la réalité physique, la méthode EMD et valider le concept de caractérisation des fonds marins. De nombreux articles de la littérature traitent de la génération de surfaces 1D ou 2D [3],[4]. Généralement la surface décrite par le champ de hauteurs  $z(\mathbf{r})$  est considérée comme la réalisation d'un processus stochastique. Elle est obtenue 1) en générant une densité spectrale de puissance  $W_s(\mathbf{K})$  prédéfinie mais dans laquelle phase et amplitude sont choisies de manières aléatoires, 2) en transformant le spectre précédant dans le domaine spatial par transformée de Fourier inverse.

Nous simulons les surfaces à partir de  $z_{rid}(\mathbf{r})$  issu d'un spectre  $W_s(\mathbf{K}) = W_{rid}(\mathbf{K})$  correspondant à des rides de sable [5].

$$W_{rid}(\mathbf{K}) = \frac{l^2 \eta^2}{4\pi} \left[ \exp\left[-\frac{l^2(K_x - K_{cx})^2 + l^2(K_y - K_{cy})^2}{2}\right] + \exp\left[-\frac{l^2(K_x + K_{cx})^2 + l^2(K_y + K_{cy})^2}{2}\right] \right] \\ \text{si } |\mathbf{K}| > K_h \\ = 0 \text{ sinon}$$

A la fréquence spatiale  $\mathbf{K}_c = (K_{cx}; K_{cy})$  correspond la longueur d'onde moyenne des rides.  $K_h$  est une fréquence spatiale de coupure. La longueur de corrélation  $l$  est la même dans les directions  $X$  et  $Y$ . Les rides sont orientées selon la direction  $X$  (crête des rides parallèle à l'axe  $(Ox)$ ). La figure 1 présente un relief de fonds marins simulé à partir de la méthode décrite précédemment. Le fond est modélisé par des rides de longueurs d'ondes moyennes de 0.2 m.

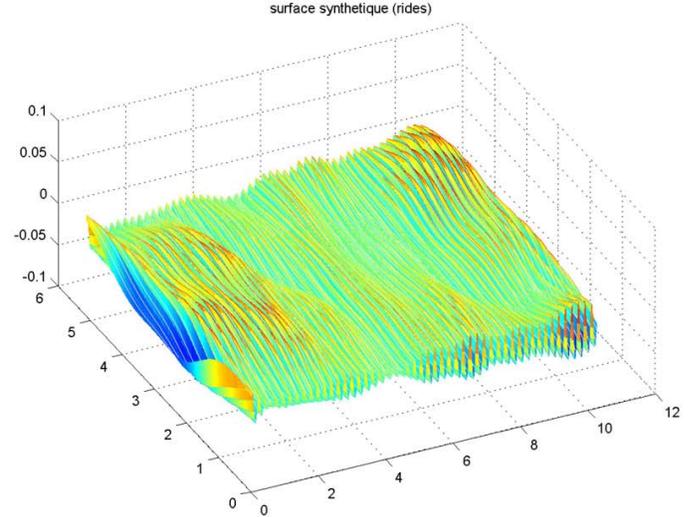


FIG. 1: Exemple de surface synthétisée de dimension 10 m par 5 m ( $l = 0.6\text{m}$ ;  $K_h = 10 \text{ m}^{-1}$ ;  $\eta = 202.6$ ;  $K_c = 31.5\text{m}^{-1}$ ), échantillonnage spatial tous les 0.02m.

### 4 Résultats

L'application de l'EMD à des images nécessite une interpolation bi-dimensionnelle (2D). Pour le moment il n'y a pas d'algorithme 2D efficace, au même titre que le cas 1D, pour l'analyse des données images [6]-[7]. Dans le cas de la caractérisation des fonds marins à partir de profils bathymétriques, les motifs de fond ont souvent une direction privilégiée (par exemple crête des dunes perpendiculaire au courant) et on se limite donc dans notre cas à une décomposition  $N \times 1\text{D}$ , i.e., ligne par ligne de l'image bathymétrique dans la direction privilégiée (on prend soin auparavant d'effectuer une rotation de l'image si besoin).  $N$  est la largeur de l'image. L'analyse de chaque ligne bathymétrique ne donnant pas le même nombre d'IMFs, le nombre d'images "empiriques" sera donné par la ligne bathymétrique dont le nombre d'IMFs est minimal. L'image empirique correspondant au mode  $i$  est construite ligne par ligne, chaque ligne correspondant à l'IMF  $i$ . La figure 2(a) montre une image de bathymétrie obtenue par un Sonar multifaisceaux. Un exemple d'une ligne bathymétrique est représenté par la figure 2(b) suivie des différents IMFs en allant des oscillations fortes (faibles longueurs d'ondes) vers les oscillations faibles (grandes longueurs d'ondes). Le dernier graphe correspond à la tendance globale du profil. Les figures 3 et 4 montrent les images empiriques correspondant aux images synthétique (figure 1) et réelle (figure 2(a)). La décomposition de la figure 2(b) est confirmée par les images empiriques représentées par la figure 4. Les figures 3(a)-(d) et 4(a)-(d) représentent des rides avec des longueurs d'ondes différentes. Les figures 3(a)-(d) mettent en évidence le fait que les rides simulées de longueur d'onde fixe (0.2m) ne constituent pas une seule IMF. Les Figures 4(e)-(f) représentent des images de dunes. La figure 5 représente les fréquences instantanées des trois IMFs du profil no. 45. La figure 5(c) montre que la fréquence instantanée est globalement constante ce qui suggère que l'IMF correspondante peut être associée à une dune. Par contre l'IMF 1 (Figure 5(a)),

où la fréquence instantanée varie fortement, correspond plutôt à une ride. Même si la fréquence instantanée est constante sur l'ensemble du profil no. 45 de l'image empirique no. 7 (figure 5c), l'apparition du pic peut être du au fait qu'à partir de ce dernier l'hypothèse de direction privilégiée n'est plus valable ou alors du à un problème d'acquisition de l'image Sonar. Une étude plus approfondie de cet aspect est en cours.

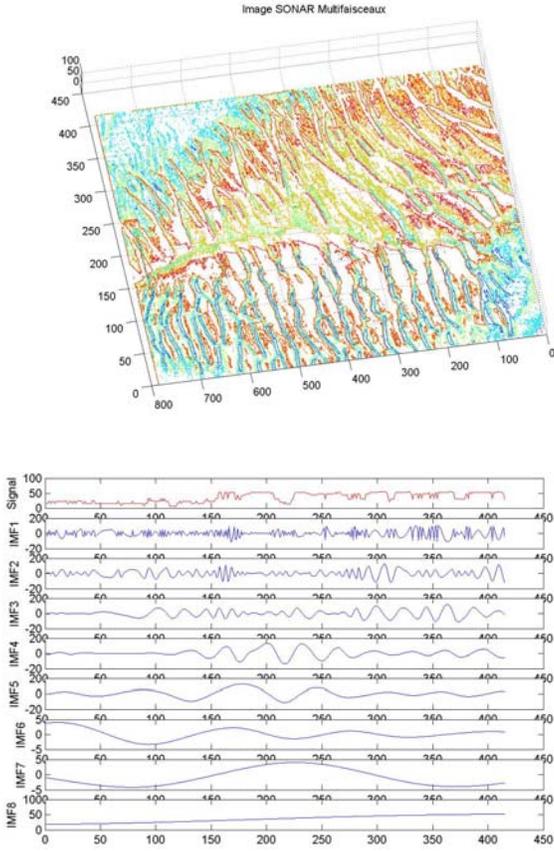


FIG. 2: (a) Image Sonar multifaisceaux. (b) Décomposition modale empirique d'un profil bathymétrique.

## 5 Conclusion

Les résultats de la décomposition des profils bathymétriques montrent que les modes empiriques obtenus sont très proches des ondulations du fond marin et qu'une classification de ces modes en oscillations de base telles que des dunes ou rides est alors possible. Une analyse sur plusieurs images avec vérité terrain est nécessaire pour une bonne correspondance entre les images empiriques obtenues et les images des dunes (petite et grande) et les images des rides (différentes longueurs d'ondes).

## References

[1] P. Blondel and B.J. Murton, Handbook of seafloor sonar imagery, ed Wiley-Praxis, 1997, pp 200-205.

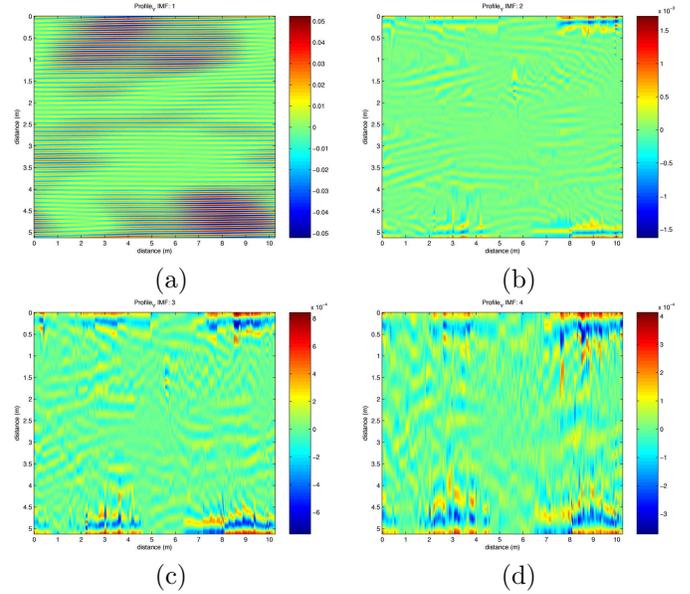


FIG. 3: Images empiriques de l'image synthétique. (a) Première image empirique (b) Deuxième image empirique (c)-(d) Dernières images empiriques.

**a**

**b**

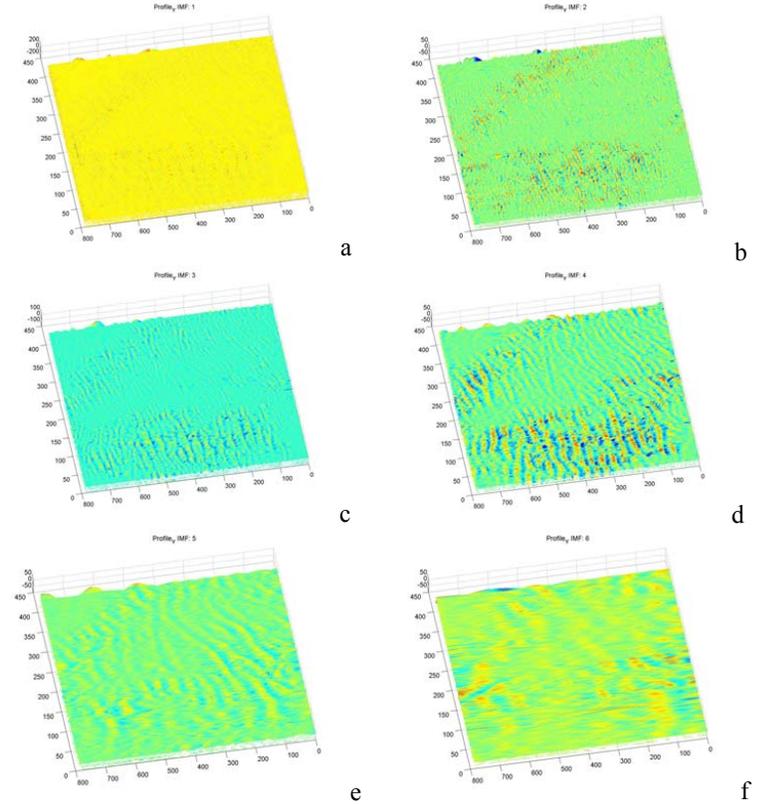


FIG. 4: Images empiriques de l'image Sonar. (a) Première image empirique (b) Deuxième image empirique (c)-(f) Dernières images empiriques.

[2] N.E. Huang et al., "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis", *Proc. Roy. Soc. London A*, vol. 454, pp. 903-995, 1998.

[3] E. Thorsos, "The validity of the Kirchoff approxi-

mation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83(1), pp 78-92, 1988.

- [4] APL-UW Technical report 9407, ”APL-UW high frequency ocean environmental acoustic models handbook”, 1994.
- [5] E. Pouliquen, A.P. Lyons and N.G. Pace, ” Penetration of acoustic waves into rippled sandy seafloors ”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108(5), pp 2071-2081, 2000.
- [6] A. Linderhed, ”2D empirical mode decomposition in the spirit of image compression”, *Wavelet and ICA Applications IX, SPIE Proceedings*, Orlando, vol. 4736, pp. 1-8, 2002.
- [7] J.C. Nunes, et al., ”Image analysis by bi-dimensional empirical mode decomposition,” *Image and Vision Computing*, vol. 21, no. 12, pp. 1019-1026, 2003.

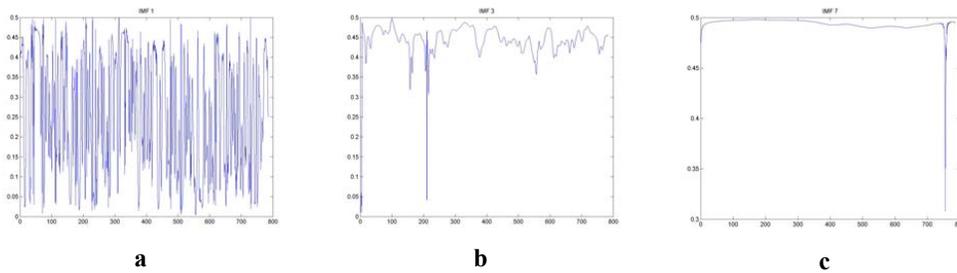


FIG. 5: Fréquences Instantanées de trois profils bathymétriques. (a) IMF 1 (ride). (b) IMF3 (ride). (c) IMF7 (dune).