

# Séparation d'ondes sismiques par Ligne de Partage des Eaux sur des images Temps-Échelle

Antoine ROUEFF, Jocelyn CHANUSSOT, Barbara NICOLAS, Jérôme I. MARS

Laboratoire des Images et des Signaux (LIS)  
LIS/ENSIEG/OSUG BP46, 38402 Saint-Martin d'Hères cedex, France  
antoine.roueff@lis.inpg.fr, jocelyn.chanussot@lis.inpg.fr  
jerome.mars@lis.inpg.fr

**Résumé** – Cet article traite de l'utilisation du traitement du signal et du traitement d'image pour la séparation d'ondes sismiques. Il existe déjà de nombreux traitements de séparation pour les signaux géophysiques. Notamment la transformée en ondelette continue permet de représenter les signaux (1D) comme des images 2D où les événements sismiques pourront être bien localisés et isolés. En segmentant cette représentation par un algorithme de croissance des germes (la ligne de partage des eaux), on estime la contribution énergétique des différentes ondes. Il est ensuite possible de reconstruire le signal dans sa représentation temporelle pour chacune des ondes en calculant la transformée en ondelette inverse de chacun des motifs ainsi isolés. La continuité entre les signaux dans un profil sismique permet un suivi des germes de segmentation d'une image à l'autre, et donc un suivi des ondes. Cet algorithme est validé sur plusieurs données réelles.

**Abstract** – This article deals with the use of both image and signal processing for the unsupervised separation of seismic waves (validated on real data). The Continuous Wavelet Transform (CWT) allows a 2D representation of a 1D signal, where the different seismic events are well localized and isolated. The segmentation by the watershed algorithm of this 2D representation enables the estimation of the CWT of each wave. Then, by estimating the inverse wavelet transform, the time representation of the wave is recovered. The continuity from one trace to the other enables the tracking of the waves from one image to the next. Thus, the whole profile can be treated automatically. This algorithm has been validated on several real data.

## 1 Introduction

Cet article traite de la mise en œuvre d'un algorithme de séparation d'ondes automatique, lors du traitement d'un profil sismique. Il se situe dans le cadre de l'analyse de données géophysiques réelles qui a pour but de faciliter l'analyse des structures du sous-sol par les géophysiciens pour la prospection pétrolière [7]. Nos données sont acquises de la manière suivante :

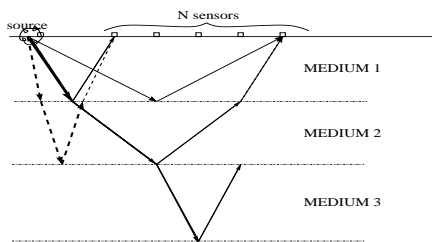


FIG. 1: Illustration des phénomènes de réflexion

Une source sismique (explosion) est émise à la surface. Une rangée de capteurs disposés de manière équidistante enregistre alors les signaux qui se sont propagés dans le sol. La figure 2 présente un exemple de relevé sismique (ou profil) sur lequel plusieurs ondes peuvent être identifiées. L'abscisse et l'ordonnée sont respectivement l'axe temporel et spatial (distance). Sur cette figure, apparaissent deux ondes de Rayleigh, particulièrement énergétiques et gênantes pour l'interprétation, ainsi que des ondes réfléchies

permettant de les identifier des réflecteurs profonds.

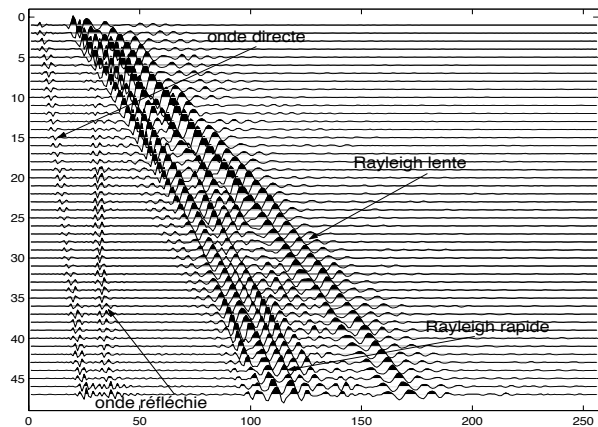


FIG. 2: Profil sismique (données réelles)

Le but du géophysicien est de pouvoir interpréter chacun des événements sismiques. Pour cela, il doit avoir recours à des outils de séparation d'ondes (ou de sources). Dans la littérature, des méthodes spécifiques ont été proposées telles que les filtres spatiaux (médians, SVD, filtres de polarisation), ou les filtres fréquentiels (FK, SMF) [4], [5]. Ces techniques, bien que performantes, sont parfois inopérantes dans des cas complexes. Nous proposons comme alternative dans certain cas, d'utiliser les résultats de M. Q. Nguyen qui a montré qu'un partitionnement du plan temps-échelle permet une séparation robuste des ondes.

Dans cet article, nous proposons d'automatiser la méthode de partitionnement en opérant une segmentation par croissance de germes dans le plan 2D. Dans la quatrième partie est exposé le problème du suivi des germes de segmentation d'une trace à l'autre. Enfin, la dernière partie illustre la robustesse de l'algorithme en présentant les résultats obtenus sur des données réelles.

## 2 Transformée en Ondelette Continue

La Transformée en Ondelette Continue (TOC) permet de représenter en deux dimensions un signal temporel :

$$TOC(f)(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Une représentation en ondelette est construite en comparant localement le signal en temps avec une copie dilatée (ou comprimée) de l'ondelette de référence [2]. La localisation énergétique du signal temporel dans le plan temps-échelle est obtenu en regardant l'enveloppe de cette ondelette, (c'est-à-dire dans notre cas d'ondelette complexe, en calculant le module) et permet de bien identifier les ondes. Ceci est illustré sur la figure 3 où les ondes de Rayleigh (rapide et lente) sont mieux identifiées l'une de l'autre sur le module de l'ondelette que sur la trace en temps.

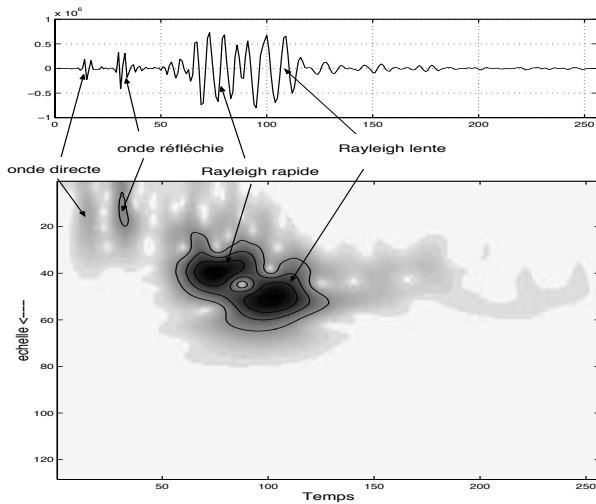


FIG. 3: Représentation temps-échelle (module)

L'ondelette de référence (ou ondelette mère) qui est le plus souvent utilisée pour l'étude des signaux sismiques est l'ondelette de Morlet [3] définie par :

$$\psi(t) = (\pi t_0)^{-1/4} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 + 2i\pi f_0 t\right] \quad (2)$$

Une fois calculé le module de la transformée en ondelette, on peut utiliser des masques construits manuellement [6], qui isolent les différentes ondes dans le plan temps-échelle. Ensuite, l'onde isolée est reconstruite avec la Transformée en Ondelette Inverse (TOI). Ce processus est résumé sur la figure 4 pour une trace de profil sismique. Cette

séparation doit être effectuée sur toutes les traces du profil. Dans un premier temps, notre but est d'automatiser la détermination du masque par une segmentation de l'image temps-échelle. Cette segmentation sera faite par un algorithme de croissance de germes.

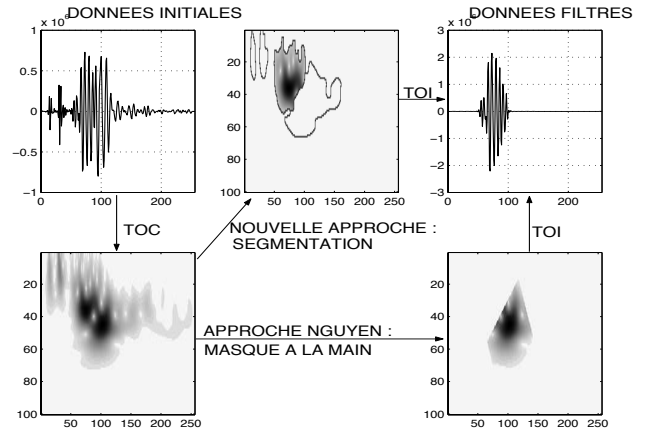


FIG. 4: Isolement et reconstruction de l'onde de Rayleigh rapide

## 3 Segmentation 2D par la ligne de partage des eaux

Le type d'image à segmenter est représenté sur la figure 3. Il est visible sur cette image que chaque onde est bien localisée dans le plan temps-échelle : à chaque onde correspond une zone d'énergie caractérisée grossièrement par une sorte de colline. En prenant le négatif de l'image module, chaque onde est alors caractérisée par un minimum local. Nous proposons d'utiliser l'algorithme de segmentation appelé la "Ligne de Partage des Eaux" (LPE) décrit par L. Vincent et al dans [8]. C'est un algorithme de croissance de germes qui à chaque minima d'une image associe une région.<sup>1</sup>

La figure 5 illustre le principe de la segmentation sur une courbe (en 1D donc) qui ne correspond pas à un signal sismique, mais qui peut être représentative d'une coupe de l'image module à une échelle donnée. Les germes sont placés à chaque minima de la courbe. Ensuite l'immersion de la courbe dans de l'eau est simulée. L'eau s'infiltre à travers les germes, et lorsque 2 régions se rejoignent, un barrage est construit pour séparer les régions. A la fin du traitement, 2 murs séparent les 3 régions. En étendant ce principe 1D en 2D (les courbes deviennent des surfaces), à la fin de la segmentation, la ligne de partage des eaux de la surface sépare les différents bassins de notre image. Cette ligne est tracée en noir sur l'image du milieu de la figure 4.

Le principal problème de cette technique est la sursegmentation qui peut être engendrée par la présence de minima dus au bruit présent dans le signal. Ce problème de

<sup>1</sup>. souvent la LPE est appliquée sur le gradient de l'image, ce qui crée des problèmes, mais ce n'est pas le cas ici.

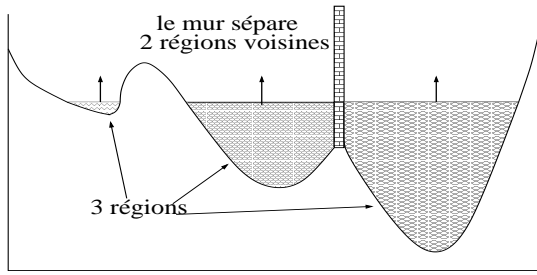


FIG. 5: Illustration de la ligne de partage des eaux sur une courbe 1D

sursegmentation est résolu de deux façons :

- Un seuillage de l'image module est effectué afin d'affecter tous les pixels de faible amplitude à la région du fond (représentée en clair sur l'image en haut à droite sur la figure 8). Cette région contient les pixels qui n'appartiennent pas aux régions des ondes précédemment caractérisées par la segmentation.
- Une transformation  $h_{max}$  (décrite dans [1]) est appliquée sur l'image module afin de supprimer les minima de faibles dynamiques qui gênent notre algorithme de croissance des germes. Cette transformation est illustrée sur la figure 6 : le minima en (70) est éliminé.

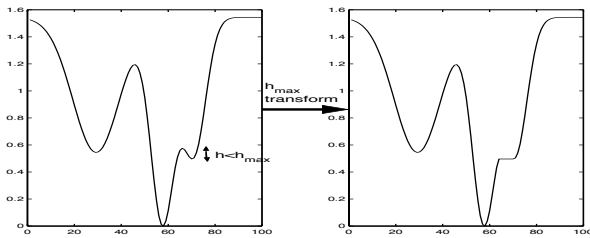


FIG. 6: Illustration de la transformation  $h_{max}$

Il est important de souligner que connaissant la position des germes de l'image, la segmentation se fait de façon autonome.

## 4 Suivi de la position des germes

Rappelons que l'on dispose de  $N$  images temps-échelle qui proviennent des  $N$  capteurs. L'empilement de ces  $N$  images (après seuillage pour la visualisation) est représenté figure 7. On observe la présence de différents tunnels caractérisant les différentes propagations.

Notre but est de segmenter ces 4 tunnels. Pour chaque image, les germes de la segmentation doivent être déterminés. Cependant, pour ne pas avoir à placer tous les germes sur toutes les images sans information a priori, les opérations de segmentation et d'estimation des germes vont être alternées. La figure 8 résume le processus de suivi : Pour chaque région, l'image est filtrée par le masque du précédent label. Ce masque ne convient pas parfaitement à la nouvelle image, mais il n'est pas très différent de ce que serait le contour de la tache car on suppose que les composantes de l'image n'ont pas beaucoup changées. Ainsi en seuillant cette image filtrée, on obtient des germes dont les posi-

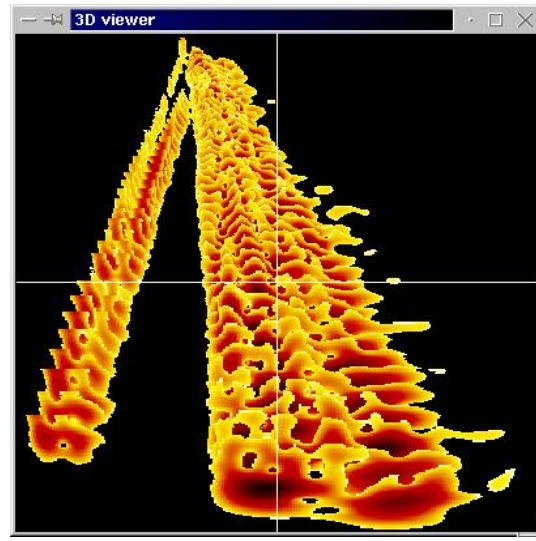


FIG. 7: Empilement d'images temps-échelle formant des tunnels

tions seront bien adaptés à la prochaine segmentation qui permettra d'estimer les bons contours. L'important est d'avoir les sommets des zones correspondant aux ondes pour que la segmentation s'effectue correctement.

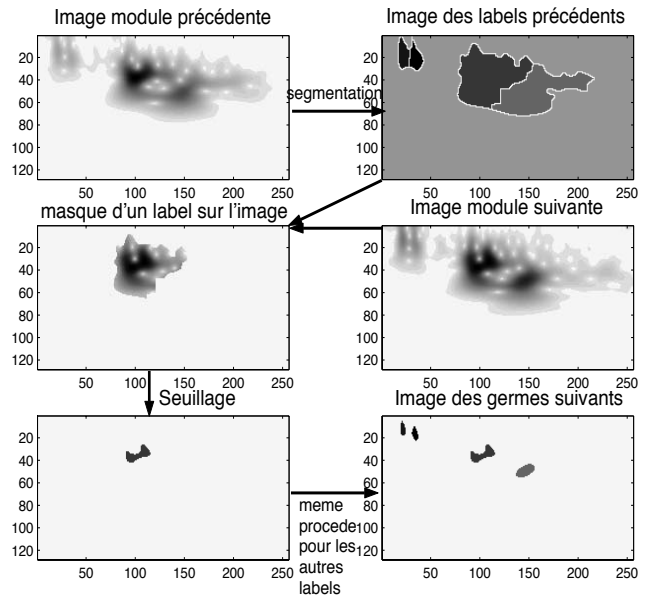


FIG. 8: Estimation des nouveaux germes

Ce procédé est initialisé sur la dernière image (où les événements sont les plus séparés spatialement) par le calcul des germes. Ces germes peuvent être déterminés de deux façons : soit en les choisissant directement sur la figure, soit en cherchant les maxima locaux avec une forte dynamique. Dans ce dernier cas, il y a un compromis entre ce qui est considéré comme du bruit (minima de faible dynamique), et comme une onde (minima de forte dynamique). Pour cette raison cette première étape est souvent effectuée "à la main".

Cette opération permet le suivi de l'onde, et l'autonomie complète de l'algorithme de séparation. En effet, après avoir isolé les différents motifs correspondant aux

différentes ondes, il est possible de reconstruire le profil sismique de chaque onde en calculant la transformée en ondelette inverse du motif isolé pour chaque trace (*i.e.* répéter pour toutes les traces du profil le procédé illustré pour une trace par la figure 4). Nous verrons dans la prochaine partie l'illustration de ce procédé par des résultats sur des données réelles.

## 5 Résultats et conclusion

Les données présentées ont été enregistrées à Chantourne (France). Partant du profil de la figure 2 (données de départ), les images des modules des TOC des différentes traces ont été empilées pour obtenir la figure 7. Ensuite, ces 4 tunnels ont été identifiés (figure 9) grâce à notre algorithme de ligne de partage des eaux et de suivi des germes. Après application des masques sur les différentes régions, et en calculant les TOI, chaque profil est reconstruit (figure 10).

Les résultats montrent que les ondes sont séparées. Seul le cas où l'onde réfléchie va se cacher derrière l'onde de Rayleigh rapide (elles ont fusionné dans le plan temps-échelle) n'a pas pu être résolu. Rappelons que cette opération a nécessité très peu d'intervention de la part de l'opérateur. D'autres essais ont été effectués sur d'autres données réelles avec de bons résultats, tant que les ondes étaient bien séparées dans le plan temps-échelle. Dans les cas malheureux, d'autres techniques peuvent être envisagées pour séparer les ondes avant, ou après, cette première étape de séparation.

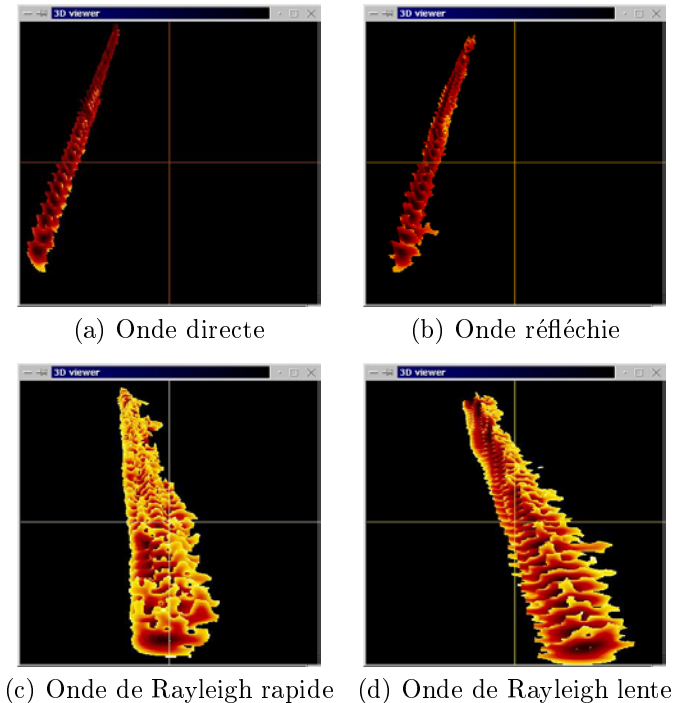


FIG. 9: Empilement des 47 images temps-échelle filtré par chacun des 4 labels

Les prochains efforts mettront l'accent sur l'amélioration de la reconstruction dans le cas où les ondes sont très

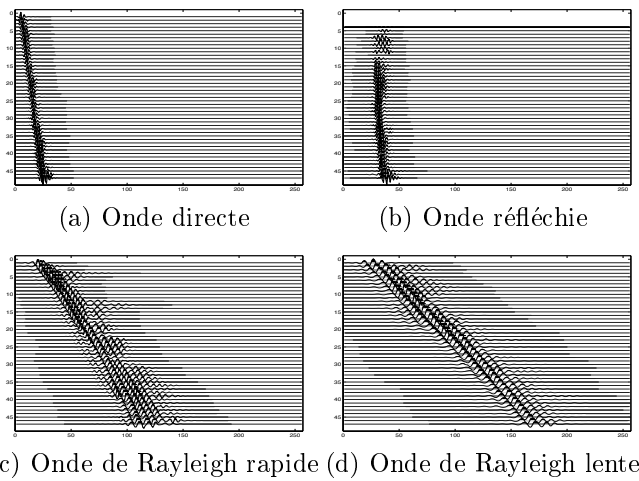


FIG. 10: Profils des ondes séparées

proches dans le plan temps-échelle, et ainsi interfèrent. Un autre axe de recherche possible serait de déterminer le squelette (ou plutôt, l'ultime érosion) du volume 3D afin de récupérer les caractéristiques des différentes propagations. La question de la projection de notre ondelette estimée (*i.e.* après filtrage par le masque issue de la segmentation) dans un espace d'ondelette reconstructible semble une voie de recherche aussi intéressante. Enfin, augmenter la robustesse du suivi afin de suivre des ondes croisées dans le profil sismique semble une tâche importante pour les géophysiciens.

## Références

- [1] S. Beucher. *Mathematical morphology*. Ecoles des Mines, Spring School, Fontainebleau, 1980.
- [2] I. Daubechies. Ten lectures on wavelets. *SIAM*, 1992.
- [3] P. Kumar and E. Foufoula-Georgiou. Wavelet analysis for geophysical application. *Reviews of Geophysics*, 1997, pp.385-412.
- [4] J.L. Mari, F. Glangeaud, and F. Coppens. *Signal Processing for Geologists and Geophysicist*. Ed Technip, Paris, 1999.
- [5] J. Mars, J.W. Rector, and S. K. Lazaratos. Filter formulation and wavefield separation of cross-well seismic data. *Geophysical Prospecting*, 1999 pp. 611-636.
- [6] M. Nguyen. *Analyse Multi-dimensionnelle et analyse par ondelettes des signaux sismiques*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.
- [7] A. Roueff, B. Nicolas, J. Chanussot, and J. Mars. Un-supervised seismic wave separation in the time/scale plane. In *63st Meeting of European Association of Geophysicists and Engineers, Amsterdam, Expanded Abstracts*, 2001.
- [8] L. Vincent and P. Soille. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulation. *IEEE Trans. PAMI*, Vol 13, No 6, 1991, pp. 583-598.