

Nouvelle méthode d'estimation de la dispersion à partir d'un réseau linéaire de capteurs

New estimation method of the dispersion from a linear array of sensors

Antoine Roueff¹, Jérôme I. Mars², Jocelyn Chaussoot²,
Helle Pedersen³

¹Laboratoire de Détection et de Géophysique (LDG), CEA/DASE/LDG - BP12 - 91680 Bruyères-le-Chatel, France

²Laboratoire des Images et des Signaux (LIS), BP 46 - 38402 Saint Martin d'Hères Cedex France,
CNRS, UMR 5083, OSUG, GDR Information Signal Image viSion (ISIS)

³Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique (LGIT), BP 53 - 38041 Grenoble

Manuscrit reçu le 10 février 2004

Résumé et mots clés

L'estimation de la dispersion est un objectif important en traitement des signaux sismiques, notamment lors de l'acquisition de données surfaciques. Nous proposons dans cet article un nouvel algorithme qui effectue l'estimation de la dispersion d'une onde à partir d'un réseau linéaire de capteurs en utilisant les propriétés du plan temps-fréquence. Cette estimation permet une caractérisation robuste et l'extraction des ondes dispersives d'un profil sismique. Les méthodes classiques sont basées soit sur l'interprétation des représentations temps-fréquence de chaque trace, soit sur l'interprétation de la représentation fréquence-vitesse de l'image du profil en entier. Notre méthode peut être interprétée comme une approche hybride dans la mesure où elle propose une représentation simultanée temps-fréquence-vitesse. Dans cet algorithme, l'étape cruciale est la modélisation de la propagation par une double correction : déphasage et retard, et ce, autour de chaque fréquence. Le principal avantage de notre algorithme est que le gain obtenu en résolution permet de séparer plus facilement les différentes ondes. Une comparaison entre les différentes méthodes classiques et la méthode proposée est présentée sur un profil synthétique complexe ainsi que sur des données réelles.

Analyse temps-fréquence, fréquence-vitesse, dispersion d'onde, séparation d'ondes.

Abstract and key words

The dispersion estimation is an important objective in seismic processing and near surface acquisition. We propose a new algorithm, which performs the dispersion estimation from a linear array of geophones using time-frequency properties. This estimation enables a robust characterization and extraction of dispersive propagating waves from a seismic profile. In comparison with standard methods which are based either on the time-frequency representations of each trace or on the velocity-frequency representation of the seismic image, our method can be seen as a hybrid method since it proposes jointly a time-frequency-velocity representation. In this algorithm, the crucial step is the model of the propagation by a simultaneous time delay and phase shift correction around each frequency. The main advantage of our algorithm is that the gain in resolution leads to a more powerful tool to separate propagating waves. A comparison between the presented algorithm and other standard methods is presented both on synthetic and real data.

Time-frequency analysis, frequency-velocity, wave dispersion, waves' separation.

1. Introduction

L'analyse des ondes de surface appliquée à la caractérisation des structures du sol est un sujet d'intérêt croissant en génie civil et en géologie [Glangeaud99b]. Le fait que ces ondes se propagent le long de la surface et aient une profondeur de pénétration dans le sol qui dépend de la fréquence implique une dispersion des ondes. D'un point de vue « traitement du signal », ce phénomène signifie que les différentes harmoniques de l'onde se propagent à des vitesses différentes. Une des particularités de ces ondes est que la durée (ou support temporel) de l'onde augmente au cours de la propagation alors que la largeur de bande reste à peu près constante. La figure 3(a) présente une onde dispersive synthétique enregistrée sur un réseau linéaire de capteurs. Cette image, correspondant à l'empilement de l'ensemble des traces, est appelée un profil sismique, une trace désignant le signal enregistré par un capteur du réseau.

Le filtre qui modélise la propagation d'une onde dispersive (c'est-à-dire le filtre reliant différentes trace du profil) n'est pas un simple retard : la phase de l'onde subit également une distorsion. Dans ce papier nous nous concentrons sur l'estimation de la dispersion des ondes de surface à partir de l'étude des signaux enregistrés par un réseau linéaire de capteurs. Cette analyse a deux applications. Premièrement, en géologie, les paramètres de dispersion permettent de caractériser les propriétés du sol. Ce type d'étude est couramment effectué en génie civil. Deuxièmement, en géophysique, ces ondes de surface sont considérées comme du bruit et leur extraction (facilitée par la correction de la dispersion) augmente le Rapport Signal à Bruit (RSB) des données [Mari97].

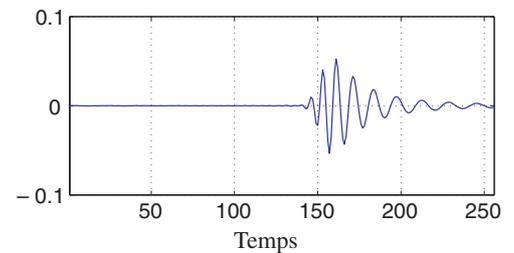
Dans la littérature, il existe deux types de méthodes pour estimer la dispersion. Les premières sont basées sur une interprétation temps-fréquence de chaque trace séparément [Dziewonski69], [Shapiro99], [Pedersen03] alors que les secondes utilisent une analyse multi-capteurs menant à une représentation fréquence-vitesse du profil [Mcmechan81], [Yilmaz87], [Mari97]. Après avoir décrit chacune de ces deux méthodes dans la partie 2, nous présentons dans la partie suivante un nouvel algorithme d'estimation proposant une représentation temps-fréquence-vitesse du profil. Le but de cette approche est d'avoir un degré de liberté supplémentaire pour pouvoir séparer plus efficacement les ondes. La dernière partie compare les résultats des différentes méthodes sur des exemples réels.

2. État de l'art des méthodes d'estimation de la dispersion

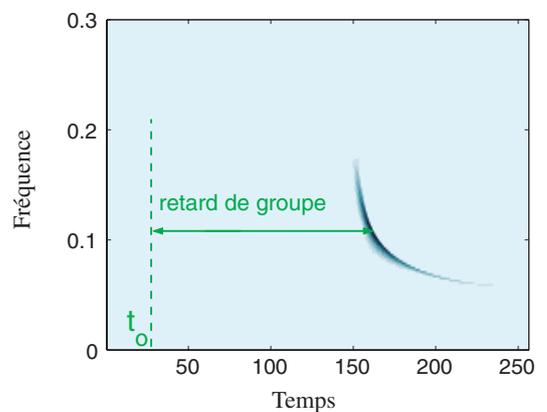
2.1. Analyse 1D

Considérons une onde w enregistrée par un capteur sismique. En supposant qu'à la source toutes les harmoniques de l'onde partent au même instant t_0 , la fonction de transfert H entre la source et le capteur peut être modélisée par :

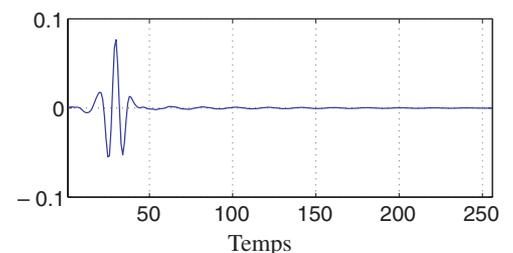
$$H(\nu) = e^{-i2\pi \int_0^\nu (\tau_g(f) - t_0) df + \phi_H(0)}, \quad (1)$$



(a) Trace initiale.



(b) Spectrogramme réalloué.



(c) Trace après correction de la dispersion.

Figure 1. Estimation de la dispersion à partir de la crête de la représentation temps-fréquence d'une trace sismique.

où $\tau_g(f)$ est le retard de groupe de l'onde tel qu'il est défini dans la communauté « traitement du signal », et $\tau_g(f) - t_o$ est le retard de groupe de l'onde, c'est-à-dire le temps parcouru par l'enveloppe de l'onde entre la source et le capteur. L'estimation de H s'effectue en deux temps. D'abord, $f \mapsto \tau_g(f)$ est estimé à partir de la représentation temps-fréquence du signal. Ensuite H est calculé à partir de l'équation (1). Un raisonnement similaire peut être mené dans l'espace en temps : on estime alors la fréquence instantanée [Baraniuk01]. Considérons un exemple synthétique : sur la figure 1(a) est présentée une trace en temps, en (b) son spectrogramme réalloué et en (c) le signal filtré par $\frac{1}{H}$. Le retard $\tau_g(f) - t_o$ est estimé à partir de la sélection de la crête du motif sur le spectrogramme. Cette méthode estime le retard de groupe entre la source et le capteur. Elle reste efficace tant que les motifs des ondes ne se recouvrent pas dans le plan temps-fréquence. Lorsque les motifs interfèrent les uns avec les autres, la représentation n'est souvent plus compréhensible.

Ce problème d'interférence est illustré figure 2 qui présente successivement le scalogramme d'un signal 1 donné, d'un signal 2 puis de la somme de ces deux signaux ainsi que les scalogrammes réalloués. Pour chaque signal pris séparément, les crêtes sont clairement définies (d), (e), mais pour la somme des deux, les différents motifs interfèrent et l'interprétation devient impossible (f).

Dans cet article, nous comparons plusieurs méthodes d'estimation de la dispersion à partir d'un profil sismique contenant plusieurs traces et dont la dispersion est constante dans tout le profil. L'application de cette méthode 1D sur un profil s'effectue en estimant la dispersion sur chacune des traces séparément, puis

en empilant les différentes estimations [Shapiro99]. Cette méthode est populaire en sismologie, où le nombre de capteurs est faible, et où l'alignement des capteurs n'est pas assuré.

2.2. Analyse multi-capteurs

Le deuxième type de méthodes est basé sur la description du profil entier (c'est-à-dire l'empilement de différentes traces sismiques) dans une représentation fréquence-vitesse. Considérons le profil sismique présenté en temps figure 3(a) et en fréquence figure 3(b) (module de la transformée de Fourier à deux dimensions (TF2D) du profil). Les axes de cette représentation fréquentielle sont la fréquence temporelle réduite liée au temps et la fréquence spatiale liée à la distance. Dans tout l'article, nous avons limité l'axe des fréquences à l'intervalle [0 0.3].

La dispersion entre le capteur n et le capteur $n + 1$ est caractérisée par la fonction de transfert h_n . Si w_n est l'onde au capteur n , alors on a $w_{n+1} = w_n * h_n$, où $*$ représente le produit de convolution. On note $H_n(f) = |H_n(f)|e^{j\phi_{H_n}(f)}$ la transformée de Fourier (TF) de h_n , avec $\phi_{H_n}(f)$ la phase de $H_n(f)$. Comme dans la méthode 1D, la dispersion est supposée constante (i.e. $h_n = h$), et le module égal à un (pas d'atténuation). Ainsi $H_n(f) = e^{j\phi_H(f)}$. En présence d'une onde, la trace n est égale à :

$$p(n,t) = \underbrace{h * (h * (\dots * (h * w)))}_{n \text{ fois}}$$

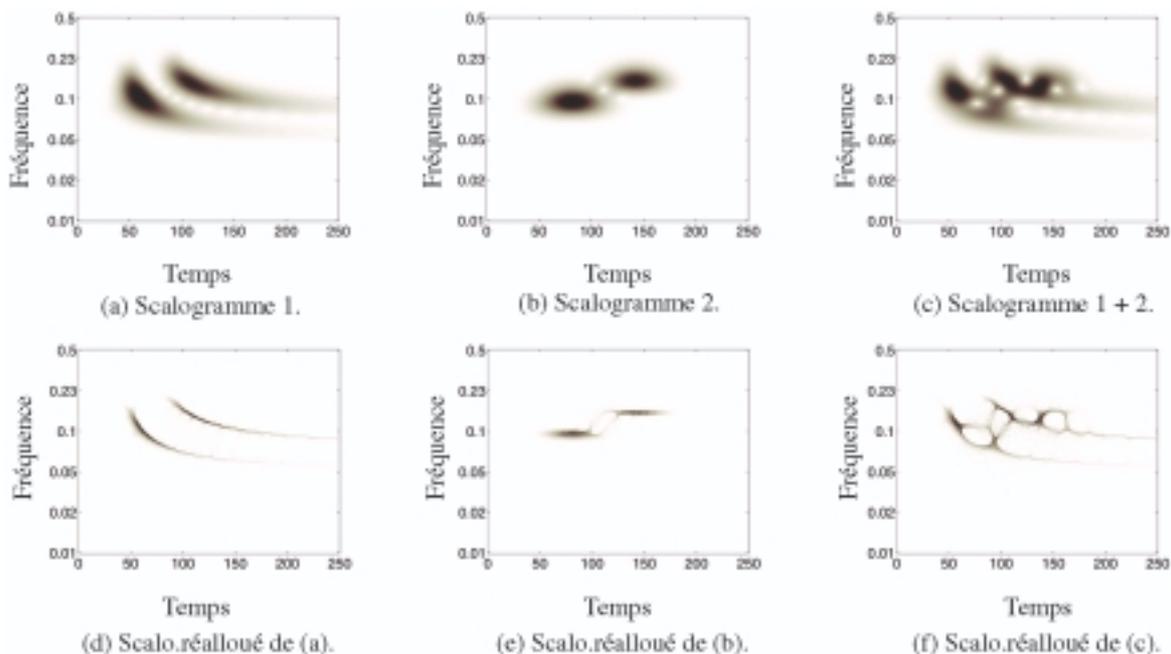


Figure 2. Problème d'interférence pour l'estimation de la crête d'une représentation temps-fréquence. En haut se trouvent les scalogrammes des signaux 1, 2 et 1 plus 2. En dessous se trouvent les scalogrammes réalloués correspondant.

Ainsi, le profil p en temps-distance peut être modélisé par :

$$p(n, t) = TF_t^{-1}[W(f).e^{jn\phi_H(f)}](t), \tag{2}$$

où $n = 0, 1, \dots, N - 1$ est le numéro du capteur, t le temps, $W(f)$ la transformée de Fourier de $w(t)$, et TF_t^{-1} la transformée de Fourier inverse selon la variable t .

Pour trouver la dispersion $\phi_H(f_i)$ à une fréquence f_i donnée, les méthodes multi-capteurs classiques procèdent en deux étapes. La première étape consiste à filtrer le profil à la fréquence f_i en calculant la transformée de Fourier à f_i . En temps, le profil filtré noté p_{f_i} devient :

$$p_{f_i}(n, t) = TF_t^{-1}[W(f_i).e^{jn\phi_H(f_i)}\delta(f - f_i)], \tag{3}$$

ce qui est égal à :

$$p_{f_i}(n, t) = W(f_i).e^{j(n\phi_H(f_i)+2\pi t f_i)}. \tag{4}$$

Ceci mène au profil représenté figure 3(c) en temps (partie réelle) et 3(d) en fréquence.

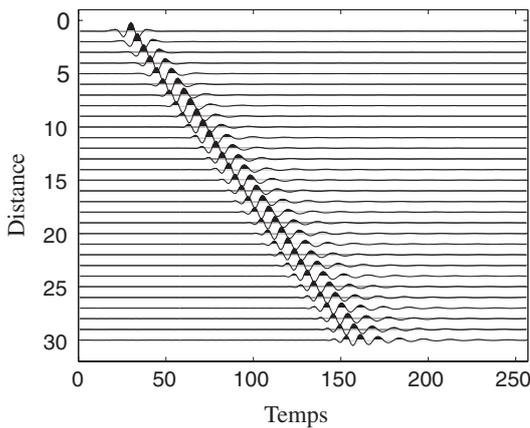
La seconde étape consiste à trouver la correction qui aligne les sinusôides de la figure 3(c). Ceci revient en fréquence à déplacer le point (symbolisé par la croix) vers l'axe des fréquences spatiales de la figure 3(d) (cette correction est symbolisée par la flèche). En fait, cette seconde opération estime la correction qui compense la dispersion à $f = f_i$. Pour choisir la meilleure correction, le critère est la maximisation de l'énergie de la somme des traces. Par exemple, si on choisit comme correction un déphasage de ϕ (ce qui signifie que la trace numéro n est déphasée par $n\phi$), la sommation S des traces du profil filtré après correction devient :

$$S(t, f_i, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{f_i}(n, t)e^{jn\phi}, \tag{5}$$

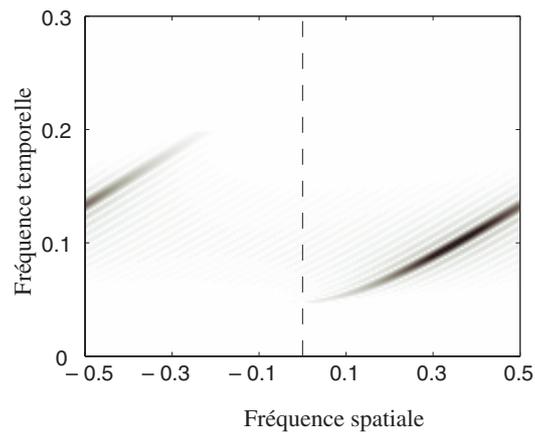
ce qui mène à :

$$S(t, f_i, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} W(f_i)e^{j(n(\phi_H(f_i)+\phi)+2\pi t f_i)}, \tag{6}$$

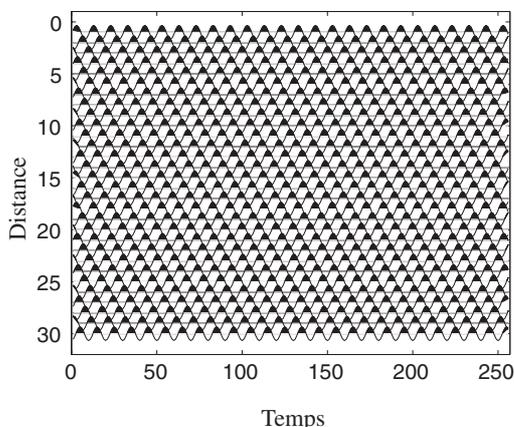
et ensuite à :



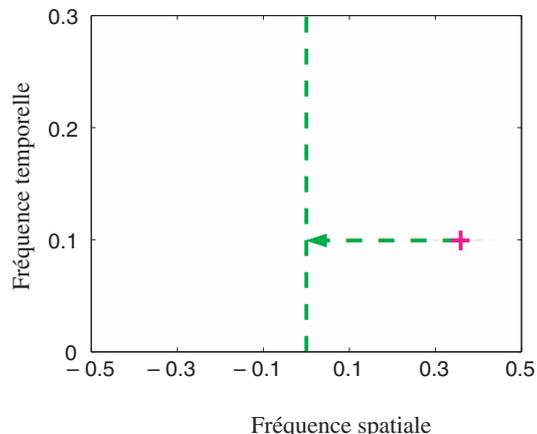
(a) Profil initial.



(b) $|TF2D|$ de (a).



(c) Profil filtré.



(d) $|TF2D|$ de (c).

Figure 3. Filtrage d'un profil synthétique contenant une onde dispersive par une exponentielle complexe. Parfaite résolution fréquentielle, mais aucune résolution temporelle.

$$S(t, f_i, \phi) = W(f_i) e^{2\pi t f_i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(\phi_H(f_i) + \phi)}. \quad (7)$$

Ainsi, le déphasage $\hat{\phi}(f_i)$ qui maximise l'énergie de $S(t, f_i, \phi)$ est :

$$\hat{\phi}(f_i) = \arg(\max_{\phi} \|W(f_i) e^{2\pi t f_i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(\phi_H(f_i) + \phi)}\|). \quad (8)$$

Ce qui est équivalent à :

$$\hat{\phi}(f_i) = \arg(\max_{\phi} | \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(\phi_H(f_i) + \phi)} |). \quad (9)$$

et ce qui mène à :

$$\hat{\phi}(f_i) = -\phi_H(f_i) [2\pi], \quad (10)$$

où $[2\pi]$ signifie modulo 2π .

En remplaçant ϕ par $-2\pi f_n$, et en appliquant une approche similaire pour chaque fréquence f_i , ceci mène à une représentation à deux dimensions (f_i, f_n) qui n'est autre que la transformée de Fourier à deux dimensions (TF2D). Son module est présenté figure 3(b). Au *maximum* de chaque ligne, on peut lire $2\pi \hat{f}_n(f_i) = \phi_H(f_i) [2\pi]$. Notons que le modulo 2π résulte en une périodisation en fréquence qui peut gêner la compréhension de l'image en fréquence (en particulier quand la vitesse est faible).

Au lieu d'appliquer comme correction un déphasage, une autre solution classique consiste à appliquer un retard τ . Dans ce cas, la somme des traces S devient :

$$S(t, f_i, \tau) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{f_i}(n, t + n\tau), \quad (11)$$

ce qui mène à :

$$S(t, f_i, \tau) = W(f_i) e^{2\pi t f_i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(2\pi \tau f_i + \phi_H(f_i))}. \quad (12)$$

Ainsi, le retard $\hat{\tau}(f_i)$ qui maximise l'énergie de $S(t, f_i, \tau)$ est :

$$\hat{\tau}(f_i) = \arg(\max_{\tau} \|W(f_i) e^{2\pi t f_i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(2\pi \tau f_i + \phi_H(f_i))}\|). \quad (13)$$

Ce qui est équivalent à :

$$\hat{\tau}(f_i) = \arg(\max_{\tau} | \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(2\pi \tau f_i + \phi_H(f_i))} |), \quad (14)$$

ce qui mène à :

$$\phi_H(f_i) = -2\pi \hat{\tau}(f_i) f_i [2\pi]. \quad (15)$$

En appliquant une approche similaire pour chaque fréquence f_i , on obtient une représentation à deux dimensions (f_i, τ) (appelée la représentation slant stack en anglais [Mcmechan81]), qui n'est autre que la transformée de Fourier de la transformée de Radon [Dietrich88]. L'image du module est présentée figure 4. Au *maximum* de chaque ligne (*i.e.* de chaque fréquence), on trouve $\phi_H(f_i) = 2\pi \hat{\tau}(f_i) f_i [2\pi]$. À noter sur la figure que cette fois la périodisation est différente selon la fréquence considérée.

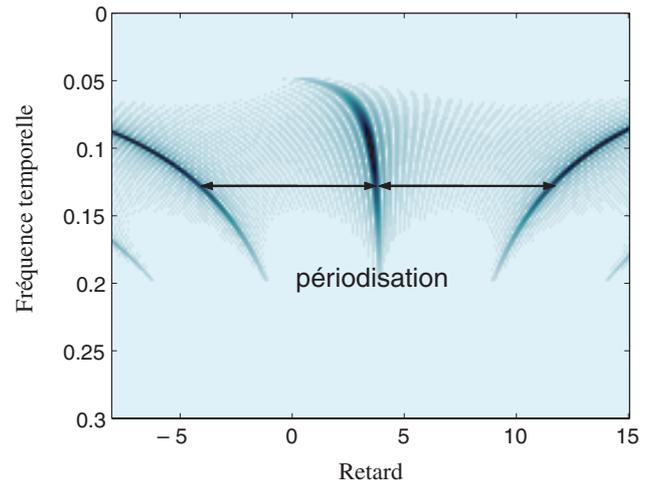


Figure 4. Représentation retard-fréquence, du profil présenté sur la figure 3(a).

Ces méthodes multi-capteurs sont rapides, et offrent de bonnes estimations de la dispersion entre les capteurs. En fait, ce type de méthodes est le plus couramment utilisé lorsque l'on étudie des profils contenant un nombre important de traces. En présence de plusieurs ondes, puisque la TF est linéaire, si les motifs des ondes ne se recouvrent pas, l'analyse peut s'effectuer sur chacun des motifs séparément.

En pratique, le problème est que la dispersion dépend de la nature du sol, et que celle-ci peut évoluer le long des capteurs. En conséquence, maintenir l'hypothèse de stationnarité spatiale de la dispersion (H_n constant) requiert de ne considérer que peu de traces à la fois [Stocker03]. Or la conséquence d'appliquer cette méthode sur peu de traces est de diminuer la résolution spatiale car celle-ci est proportionnelle à l'inverse du nombre de capteurs ($\Delta f_n = \frac{1}{N}$). Ainsi, en présence de plusieurs ondes avec des fréquences et des vitesses proches, il est possible que les différents motifs se recouvrent.

Pour illustrer ce phénomène, on considère un profil synthétique (voir figure 5(a)) contenant deux ondes non dispersives avec la même vitesse négative, plus deux ondes dispersives avec des vitesses positives très proches. Lorsque le nombre de capteurs est important (50 capteurs), les images en fréquence (figure 5(b) pour la TF2D et figure 6(a) pour la représentation retard-fréquence) sont encore interprétables malgré les interférences entre les motifs des différentes ondes. Cependant, lorsque le

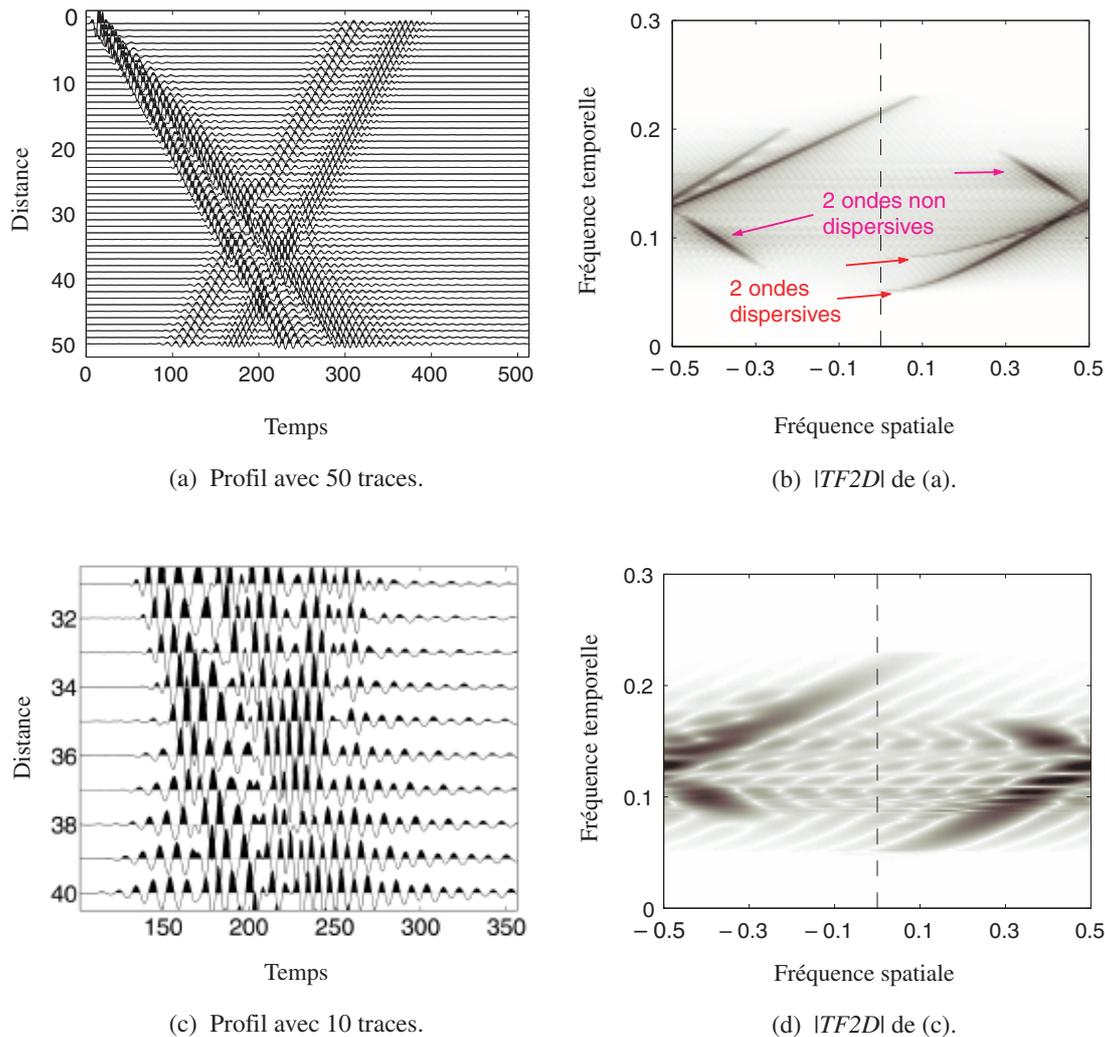


Figure 5. Problème de résolution spatiale avec la TF2D. Avec 50 traces, le profil (en haut) est facilement interprétable, mais en supposant ne disposer que de dix traces, le profil (en bas) devient illisible.

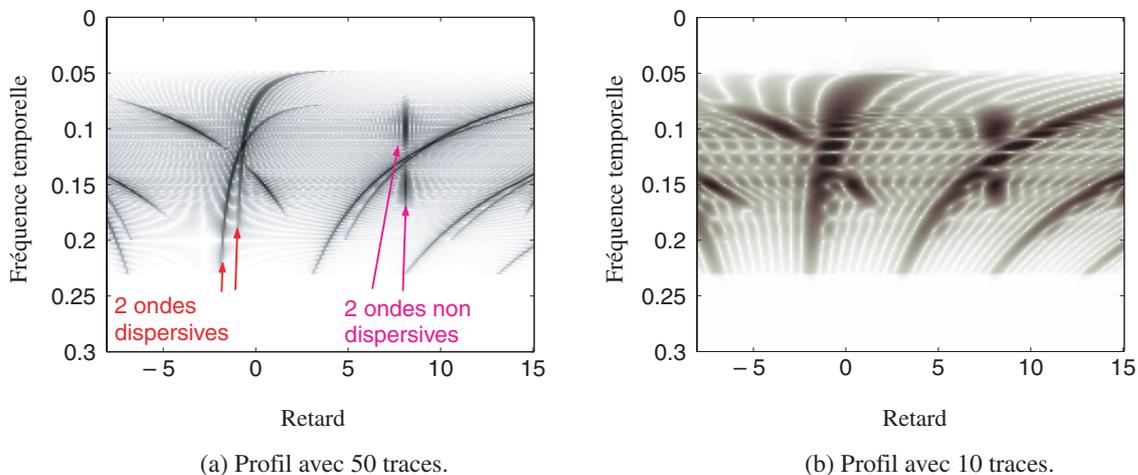


Figure 6. Représentations retard-fréquence des profils des figures 5(a) et (c). Avec 50 traces, la représentation retard-fréquence (à gauche) est facilement interprétable, mais en supposant ne disposer que de dix traces, le profil (à droite) devient illisible.

nombre de capteurs n'est plus que de dix (on garde les capteurs de 31 to 40, voir 5(c)), les images en fréquence correspondantes (Figure 5(d) pour la TF2D et 6(b) pour retard-fréquence) ne sont plus compréhensibles.

En résumé, les deux méthodes classiques effectuent l'estimation de la dispersion soit à partir d'une représentation temps-fréquence, soit à partir d'une représentation fréquence-vitesse. Dans le paragraphe suivant, nous proposons une nouvelle méthode qui effectue un compromis entre les deux méthodes classiquement utilisées. Cette méthode est illustrée toujours à partir du même profil synthétique.

3. Méthode proposée

3.1. Introduction de la résolution temporelle

En présence de plusieurs ondes, la méthode classique basée sur l'étude des représentations temps-fréquence utilise la variable temporelle pour séparer les différents motifs des différentes ondes, alors que les représentations fréquence-vitesse utilisent la vitesse. Ces méthodes sont donc complémentaires. La méthode que nous présentons à présent utilise les deux variables le temps et la vitesse pour séparer les ondes, ce qui la rend plus intéressante. Notre approche peut être interprétée comme l'insertion de la résolution temporelle dans les représentations fréquence-vitesse. Comme nous le verrons dans ce paragraphe, ceci est fait en analysant le profil avec une sinusoïde localisée dans le temps au lieu d'une exponentielle complexe $e^{-2\pi j f_i t}$. D'un autre côté, notre approche peut aussi être interprétée comme la construction d'une image temps-fréquence dans laquelle on favorise les ondes qui se propagent à une vitesse donnée. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe suivant.

La présentation de ce paragraphe est similaire au précédent où était traitée l'analyse multi-capteurs classique. La principale différence est qu'au lieu de convoluer le profil avec l'exponentielle complexe $e^{-2\pi j f_i t}$, le profil est convolué avec un signal oscillant localisé en temps: une ondelette noté ψ_{f_i} . Cette ondelette $\Psi_{f_i}(f)$ (où $\Psi_{f_i}(f) = TF_t[\psi_{f_i}(t)]$) est un filtre passe bande. Le profil filtré p_ψ peut s'écrire :

$$p_\psi(n, t) = TF^{-1}[W(f)\Psi_{f_i}(f)e^{jn\phi_H(f)}](t). \quad (16)$$

Le filtrage est local en temps. L'augmentation de la résolution temporelle et la diminution de la résolution fréquentielle qui en découle sont visibles en comparant les figures 3(c) et 8(c), et les figures 3(d) et 8(d). Un des problèmes de la basse résolution fréquentielle est que le produit du spectre de l'onde $W(f)$ par le spectre de l'ondelette $\Psi_{f_i}(f)$ n'est pas nécessairement centré sur f_i (voir figure 7). Ceci signifie qu'en trouvant la correction qui

aligne les ondelettes de la figure 8(c), et déplace le motif de la figure 8(d) sur l'axe vertical, on estime la correction qui compense la dispersion à la fréquence $f = f_m$ et non $f = f_i$. Notre but final étant l'estimation de la fonction $f_i \mapsto \phi_H(f_i)$, pour résoudre ce problème, on estime la fréquence f_m en utilisant la fréquence instantanée du profil filtré [Boashash92], et lorsque plusieurs estimations sont disponibles, la fonction $f_i \mapsto \phi_H(f_i)$ est obtenue en extrapolant la fonction $f_m \mapsto \phi_H(f_m)$.

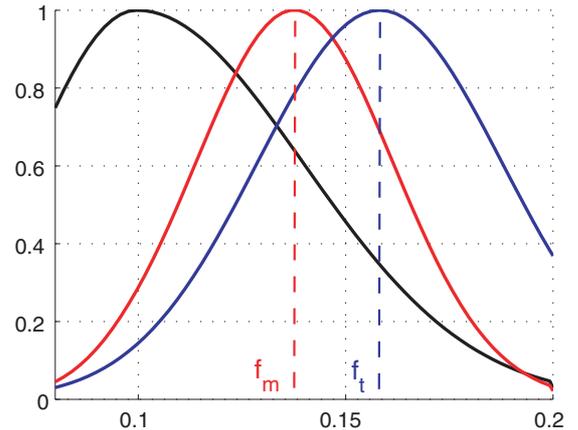


Figure 7. Problème de résolution fréquentielle. Le maximum d'amplitude des courbes est normalisé à 1. Sur la gauche se trouve le module de la TF du profil p , à droite la TF du module de l'ondelette ψ , et au milieu se trouve la TF du profil filtré p_ψ . Le biais est de $|f_t - f_m|$.

Si on considère que la largeur de bande est suffisamment petite en comparaison de la dérivée de la courbure de la crête de la figure 8(b), alors le motif de la figure 8(d) peut être assimilé à une fonction linéaire. En fait ceci est équivalent à supposer que la phase du filtre de propagation peut être approchée autour de f_m à l'ordre 1 :

$$\phi_H(f) = \phi_H(f_m) + \phi'_H(f_m)(f - f_m). \quad (17)$$

En notant $\phi_0 = \phi_H(f_m) - \phi'_H(f_m)f_m$ et $2\pi\tau_s = -\phi'_H(f_m)$, ceci peut s'écrire¹ :

$$\phi_H(f) = \phi_0 - 2\pi f \tau_s. \quad (18)$$

1. Ici τ_s est le retard entre deux capteurs et non entre le capteur et la source comme dans la section 2.1. Cependant, si la propagation est constante le long des capteurs, alors $\tau_g = n\tau_s$.

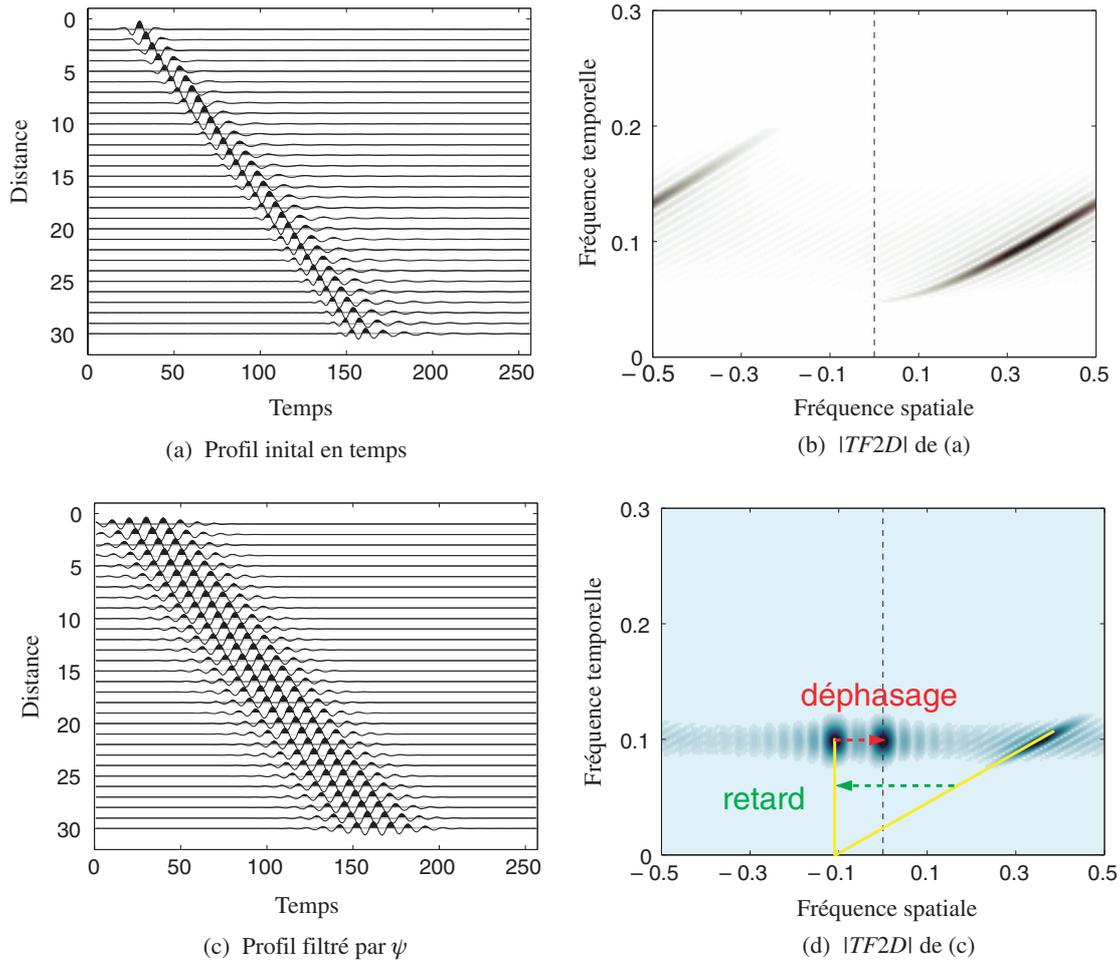


Figure 8. Filtrage du profil synthétique contenant une onde dispersive par une ondelette ψ . Moins bonne résolution fréquentielle, mais introduction de la résolution temporelle en comparaison avec la figure 3.

En ré-introduisant (18) dans (16) :

$$p_\psi(n,t) = TF^{-1}[W(f)\Psi_{f_i}(f)e^{jn(\phi_0 - 2\pi f\tau_s)}](t), \quad (19)$$

ce qui est égal à :

$$p_\psi(n,t) = w(t) * \psi_{f_i}(t) * \delta(t - n\tau_s).e^{jn\phi_0}. \quad (20)$$

En d'autres termes, la propagation de p_ψ peut être modélisée par le déphasage ϕ_0 suivi du retard τ_s . Ceci est cohérent avec la figure 8(c). Ainsi la dispersion à f_m peut être compensée en insérant un déphasage ϕ et un retard τ (symbolisés par les deux flèches figure 8(d)). Considérons la somme des traces après cette double correction :

$$S(t, f_i, \phi, \tau) = \sum_{n=0}^{N-1} w(t) * \psi_{f_i}(t) * \delta(t + n(\tau - \tau_s)).e^{jn(\phi_0 + \phi)}, \quad (21)$$

ce qui devient :

$$S(t, f_i, \phi, \tau) = w(t) * \psi_{f_i}(t) * \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t + n(\tau - \tau_s)).e^{jn(\phi_0 + \phi)}. \quad (22)$$

Il est clair que la dispersion est compensée quand $\sum_{n=0}^{N-1} \delta(t + n(\tau - \tau_s)).e^{jn(\phi_0 + \phi)} = N\delta(t)$. Et dans ce cas (voir figure 9(a)), puisque ψ et w sont localisés en temps, la somme S est aussi localisée en temps. De plus en choisissant ψ analytique et symétrique, le temps d'arrivée de l'onde (à la fréquence f_m) sur le premier capteur peut être obtenu en estimant le *maximum* d'amplitude de $|S|$.

En effectuant le même raisonnement, mais en intervertissant l'axe distance, il est aussi possible de considérer que la source se trouve au dernier capteur. Après correction, on obtient alors la figure 9(b), et le *maximum* d'amplitude est placé au temps d'arrivée de l'onde sur le dernier capteur. En présence de plusieurs ondes, l'intérêt de cette deuxième approche est que les ondes ayant des vitesses différentes ont eu le temps de se sépa-

rer. Ceci est vrai en particulier pour les ondes guidées contenant plusieurs modes.

En comparaison avec les méthodes classiques multi-capteurs, notre procédé a l'avantage de séparer les ondes qui ont des temps d'arrivées différents, même si elles ont des vitesses similaires. Par rapport aux méthodes mono-capteurs (représentations temps-fréquence), l'intérêt de notre approche réside dans la prise en compte de la redondance d'information le long des capteurs : l'étape de sommation permet de séparer deux ondes lorsqu'elles ont des vitesses différentes.

Pour les méthodes multi-capteurs classiques, on regarde pour chaque correction l'énergie du signal correspondant à la somme des traces. Dans notre procédé, nous appliquons deux corrections, et nous cherchons une troisième information qui est le temps d'arrivée de l'onde sur le dernier capteur. Puisque les deux corrections sont liées à la vitesse, on peut donc considérer être dans un espace à trois dimensions : temps-fréquence-vitesse $(t_a(f_m), f_m, \phi_H(f_m))$. D'un point de vue pratique, il faut réduire la quantité d'information à garder. Sachant qu'en présence d'une onde, la somme des traces est localisée sur le temps d'arrivée de l'onde t_a sur le dernier capteur, pour chaque temps d'arrivée t_a sur le dernier capteur, on estime le module *maximum* du signal correspondant à la somme des traces pour toutes les corrections. De plus, en présence de plusieurs ondes, afin de concentrer les motifs, lorsque l'on effectue cette recherche, on considère les corrections (τ, ϕ) pour lesquelles $t \mapsto |S(t, f_i, \phi, \tau)|$ a un *maximum* local à $t = t_a$. Ceci s'écrit :

$$(\hat{\phi}(t_a, f_i), \hat{\tau}(t_a, f_i)) = \arg \max_{(\tau, \phi) \in I_{t_a}} |S(t_a, f_i, \phi, \tau)|, \quad (23)$$

où I_{t_a} représente l'ensemble des corrections (τ, ϕ) telles que $t \mapsto |S(t, f_i, \phi, \tau)|$ a un *maximum* local à $t = t_a$.

Par ce procédé, on obtient une fonction du temps $S_{f_i}(t_a) = |S(t_a, f_i, \hat{\phi}(t_a, f_i), \hat{\tau}(t_a, f_i))|$ sur laquelle les différentes ondes sont représentées par des motifs localisés aux niveaux des *maxima* locaux (instants correspondant aux temps d'arrivée des ondes sur le dernier capteur). De plus, les corrections correspondantes $(\hat{\phi}, \hat{\tau})$ sont celles qui permettent l'estimation de $\hat{\phi}_H(f_m)$. Avec les notations de l'équation (18), on a $\hat{\phi} = -\phi_0(f_m)$ et $\hat{\tau} = \tau_s(f_m)$.

À cette étape, la fréquence f_m est toujours inconnue. En fait elle doit être estimée pour chaque correction en utilisant la fréquence instantanée :

$$f_i(t, f_i, \phi, \tau) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_S(t, f_i, \phi, \tau)}{dt}, \quad (24)$$

où $\phi_S(t, f_i, \phi, \tau)$ est la phase de $S(t, f_i, \phi, \tau)$.

Ainsi, pour chaque temps d'arrivée t_a , une estimation de la phase $\phi_H(f_m)$ est donné par l'équation (18) :

$$\hat{\phi}_H(t_a, f_i) = -\hat{\phi}(t_a, f_i) - 2\pi f_i(t_a, f_i) \hat{\tau}(t_a, f_i) [2\pi]. \quad (25)$$

Pour l'exemple avec une onde, la fonction d'amplitude présente un seul *maximum* localisé au temps d'arrivée de l'onde t_a sur le dernier capteur. Pour cet échantillon : $\hat{\phi}_H(t_a, f_i) = \phi_H(f_m)$.

Ce procédé d'estimation à une fréquence donnée rappelle la méthode d'estimation de Glangeaud dans [Glangeaud99a]. La différence est que, dans ce papier, nous effectuons cette analyse de façon automatique et non manuelle. De plus, l'utilisation de la fréquence instantanée permet d'éviter un biais dû au fait que le profil filtré ne se trouve pas à la fréquence centrale de l'ondelette. Enfin, comme nous le verrons dans le prochain paragraphe, notre méthode a de plus la particularité d'être applicable à toutes les fréquences simultanément.

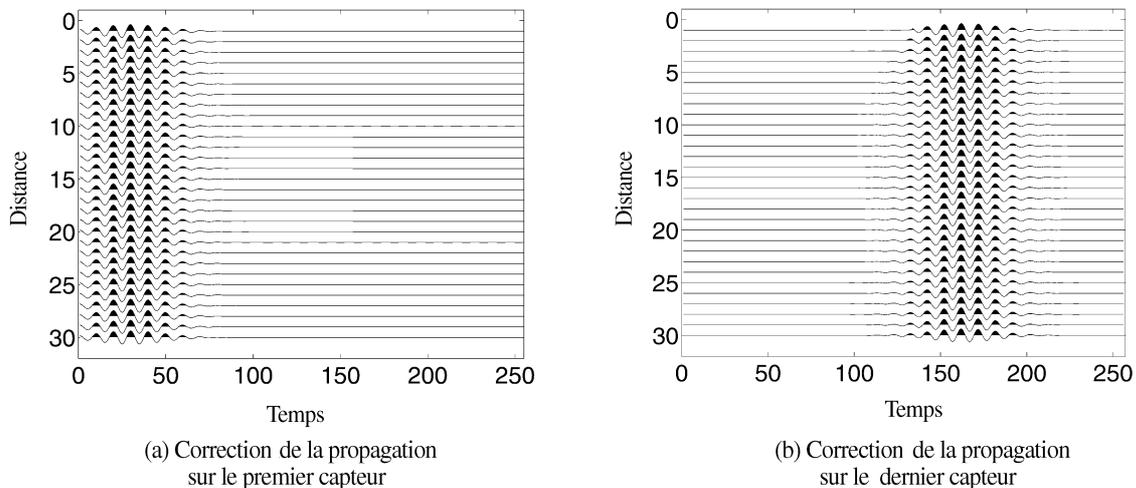


Figure 9. Correction de la dispersion du profil filtré de la figure 8(c) : à gauche en considérant que la source se trouve sur le premier capteur, et à droite sur le dernier capteur.

3.2. Application à toutes les fréquences

La paragraphe précédent a détaillé comment l'algorithme effectue l'estimation de $\phi_H(f_m)$. Effectuer une procédure similaire pour chaque fréquence f_t signifie que l'on applique un banc de filtres passe-bande $\Psi_{f_t}(f)$ sur le profil et que pour chacun, on cherche la correction qui maximise l'amplitude de la somme de toutes les traces. Puisque le filtrage est linéaire, on peut appliquer le banc de filtre après la correction et la somme des traces. On peut ainsi estimer si la correction convient à toutes les fréquences simultanément. Ceci a l'avantage de réduire considérablement le coût en calculs car l'ensemble des corrections n'est appliqué qu'une seule fois. En fait, pour chaque correction (couple déphasage, retard), une représentation temps-fréquence linéaire du signal somme est calculée. Ceci permet de visualiser les régions du plan temps-fréquence dans lesquelles l'amplitude augmente lors de la sommation. En appliquant plusieurs corrections, on obtient une pile de représentations temps-fréquence. Cet empilement peut être vu comme un volume temps-fréquence-vitesse. Au lieu de visualiser ce volume, on le projette sur le plan temps-fréquence : pour chaque couple temps-fréquence, on estime le *maximum* d'amplitude parmi toutes les images temps-fréquence. Ceci est illustré figure 10, où dans la partie de droite, on obtient une image d'amplitude et deux images donnant les arguments de déphasage et de retard correspondants.

Nous choisissons comme représentation temps-fréquence la Transformée en Ondelettes Continue (TOC). Sa résolution temps-fréquence est adaptée aux signaux sismiques [Flandrin98], [Chakraborty95]. De plus, il est nécessaire que ψ soit analytique et symétrique. Pour ces raisons, nous choisissons l'ondelette de Morlet [Morlet82].

L'algorithme obtenu est détaillé figure 11. Pour tous les exemples traités, nous avons utilisé les mêmes paramètres. Le pas de discrétisation en retard est de 0.1 échantillon, et déphasage de 0.01 radian, et les transformées en ondelette continue sont calculées sur 128 points. Ces valeurs sont très faibles, elles permettent une estimation très précise.

À la fin de l'algorithme, on obtient cinq images temps-fréquence, respectivement : l'amplitude $I_A(t, f)$, le retard $I_r(t, f)$, le déphasage $I_\phi(t, f)$ et la fréquence $I_{f_i}(t, f)$ ainsi qu'un estimateur de la dispersion $I_{\phi_H}(t, f)$. Pour l'exemple synthétique, quatre de ces images sont présentées figure 12 (l'image de $I_{f_i}(t, f)$ n'est pas proposée car elle n'a pas d'intérêt visuel). Il est à noter que l'image d'amplitude ressemble à la représentation temps-fréquence de l'onde sur le dernier capteur. L'étalement du motif en temps dépend du nombre de capteurs. Pour obtenir le motif le plus étroit, il faut n'utiliser que deux capteurs. Cependant, augmenter le nombre de capteurs permet de faire face à la présence d'un bruit incohérent lors de la sommation. Ensuite, à partir de l'image d'amplitude, une crête est définie. Elle est présentée en noir sur les quatre images. Aux coordonnées correspondant à cette crête, le retard $\tau_s(f_m)$ et la phase $\phi_H(f_m)$ peuvent être lus, respectivement sur les figures 12 (b) et (d). La fréquence correspondante f_m peut être lue sur l'image $v_i(t, f)$.

Remarque : la séparation peut être plus efficace si on dispose de connaissances *a priori* sur la vitesse des ondes. En effet, on peut insérer une ligne de test dans l'algorithme de la figure 11 pour en plus opérer un filtrage en vitesse par exemple. Considérons par exemple le profil synthétique présenté sur la figure 5 où quatre ondes sont présentes dans un profil de dix traces. On utilise l'information *a priori* que les ondes dispersives

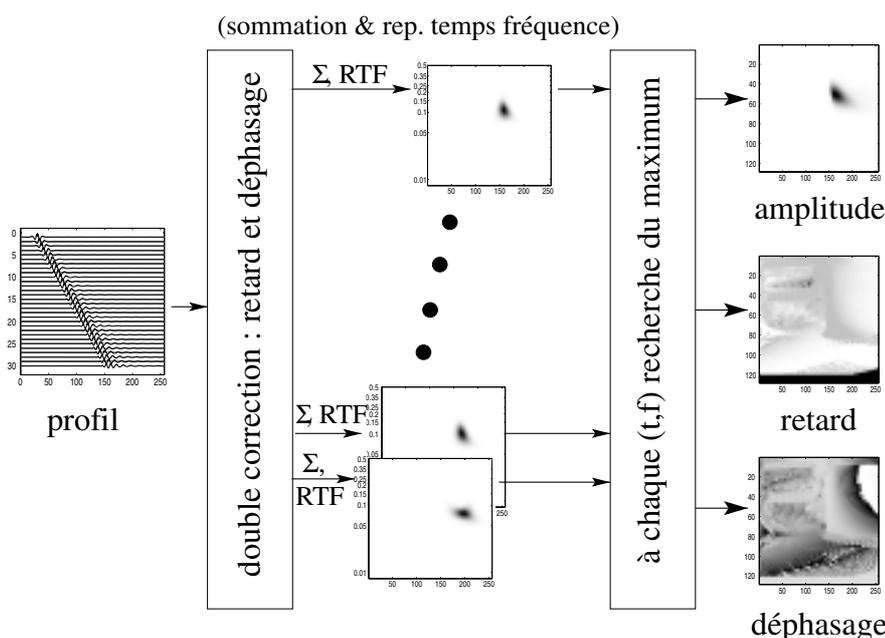


Figure 10. Illustration de l'algorithme par un schéma bloc.

Initialisation: 5 images TF $I_A(t, f) = I_r(t, f) = I_\phi(t, f) = I_{f_i}(t, f) = I_{\phi_H}(t, f) = 0$.
 Soit $(\phi, \tau)_k$ une famille de double correction, et $p(n, t)$ le profil initial
 pour chaque k , faire :
 application sur $p(n, t)$ du retard τ_k et du déphasage ϕ_k , mène à $p_k(n, t)$
 sommation le long des capteurs $S(t) = \sum_n p_k(n, t)$
 Transformée en Ondelette Continue (TOC): $T_S(t, f) = TO[S(t)]$
 definition de $A(t, f) = |T_S(t, f)|$ et sélection des crêtes de $A(t, f)$
 sur A, affecter l'amplitude à 0 hors des crêtes
 calcul de la fréquence instantanée: $f_i(t, f) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\angle T_S(t, f)}{dt}$.
 pour tous les points (t, f) , faire
 si $A(t, f) > I_A(t, f)$
 $I_A(t, f) = A(t, f)$
 $I_r(t, f) = \tau_k$
 $I_\phi(t, f) = \phi_k$
 $I_{f_i}(t, f) = f_i(t, f)$.
 $I_{\phi_H}(t, f) = -\phi_k - 2\pi\tau_k f_i(t, f)$.
 fin si
 fin pour
 fin pour

Figure 11. Algorithme générant cinq images temps-fréquence.

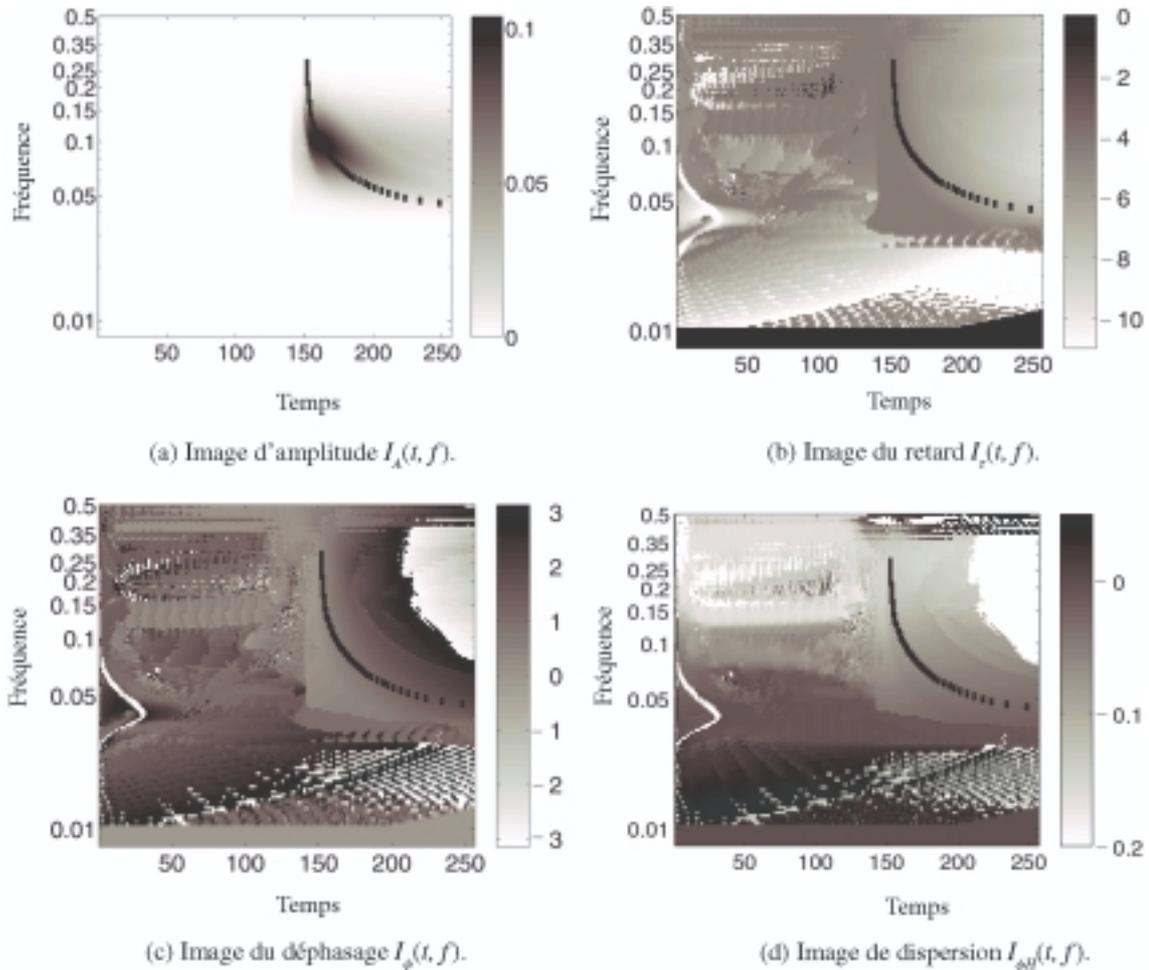


Figure 12. Description du profil de la figure 8(a) par quatre images temps-fréquence issues de l'algorithme proposé.

auxquelles on s'intéresse, ont une vitesse positive. Ainsi, seules des corrections de retard τ_k positives ont été appliquées. En conséquence lorsque le *maximum* d'amplitude parmi toutes les corrections est estimé, seules les ondes dispersives sont présentes : l'information de vitesse permet ici de séparer les ondes dispersives des ondes non dispersives. De plus, grâce à la résolution temporelle, (voir figure 13), les deux ondes dispersives sont également séparées. Un des points importants sur cet exemple est que les ondes sont séparées temporellement grâce au fait qu'elles ont des vitesses différentes, et qu'en analysant les ondes telles qu'elles arrivent sur le dernier capteur, elles ont eu le temps de s'éloigner, et donc de se séparer.

Pour cet exemple, notre algorithme a réussi à séparer les ondes alors que les méthodes classiques sont mises en défaut (voir figure 2(c) et figure 5(d)). Finalement pour chaque onde dispersive, le retard de groupe $\tau_s(f)$ et la dispersion $\phi_H(f)$ peuvent être lus sur les images (b) et (d) de la figure 13 aux coordonnées correspondant à la crête du motif associé (une de ces crêtes est présentée en noir sur la figure 13). Pour vérifier le résultat de l'estimation on trace figure 14 le module de la *TF2D* avant et après correction de la dispersion de l'onde dispersive seule. L'image montre que la dispersion est parfaitement corrigée.

L'algorithme présenté est lié aux représentations fréquence-vitesse et temps-fréquence, mais il est plus robuste car c'est une représentation temps-fréquence-vitesse, qui est ensuite projetée sur le plan temps-fréquence. Le gain en résolution permet de séparer plus efficacement les ondes.

4. Résultats sur des données réelles

4.1. Premier jeu de données

Le premier jeu de données que nous considérons est présenté figure 15(a) et (b) en temps-distance et en fréquence. Il présente une onde de Love. Sur l'image en fréquence, il apparaît que le motif de l'onde dispersive n'est pas parfaitement défini, la partie haute fréquence semble se détacher du motif principal. Ceci est dû à l'évolution de la dispersion le long des capteurs. Lorsque la dispersion est estimée à partir de l'image du module

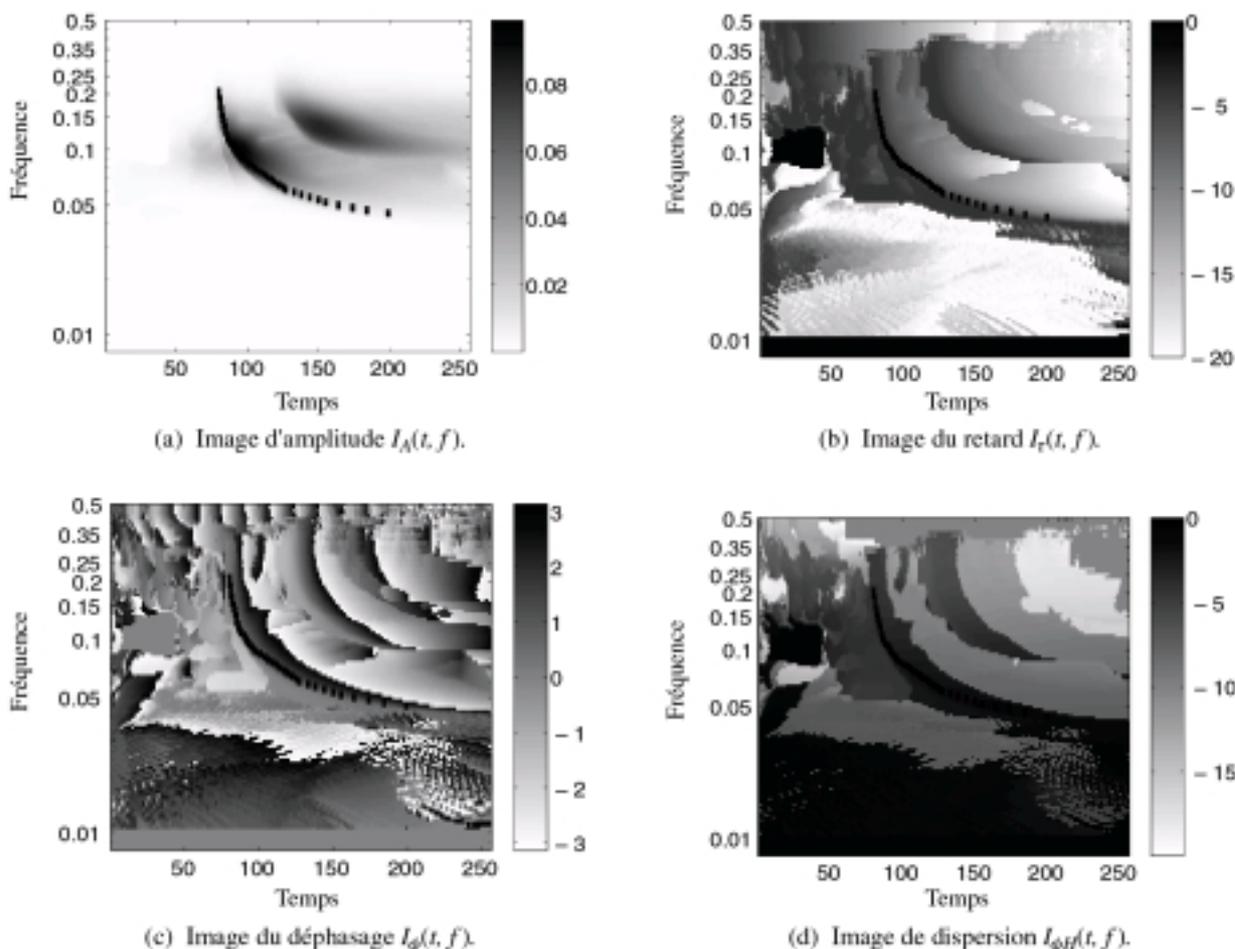


Figure 13. Description du profil de la figure 5(c) par quatre images temps-fréquence issues de l'algorithme proposé.

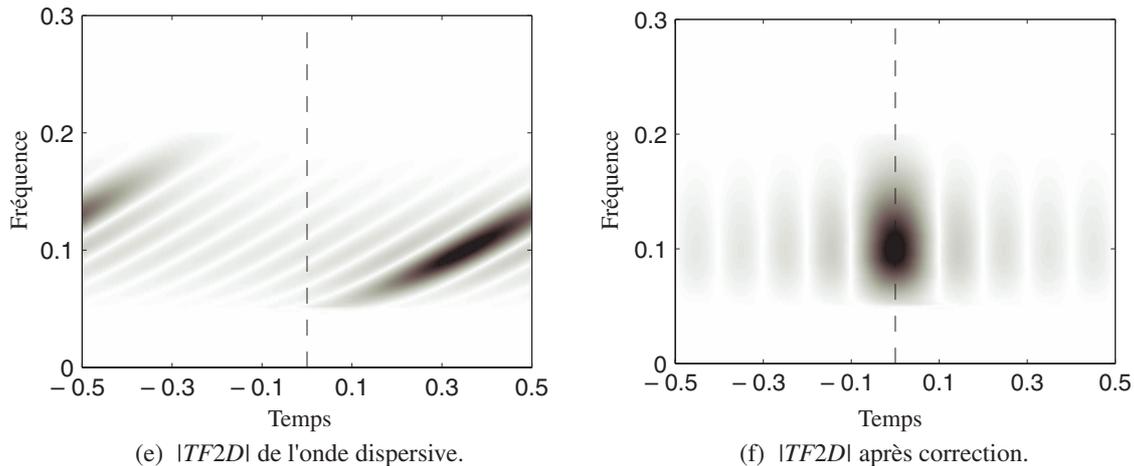


Figure 14. Résultat de la correction de la dispersion : avant à gauche, après à droite.

de la TF2D du profil entier [Glangeaud99b], le résultat obtenu, présenté figure 15(c) et (d) n'est pas parfait. Lorsque nous appliquons notre algorithme, la dispersion est estimée avec une fenêtre glissante sur deux traces, ce qui évite tout problème s'évolution de la propagation le long des capteurs. Figure 15(e) et (f) présentent le profil après correction de la dispersion avec la méthode proposée. La dispersion est mieux corrigée. La variation que l'on peut observer sur l'image de la figure 15(e) est due à l'atténuation qui n'a pas été compensée (module de H). Sur les premiers capteurs, le contenu fréquentiel est plus haute fréquence que sur les derniers capteurs. Ne pas avoir modélisé l'atténuation n'a pas gêné l'estimation de la dispersion, car celle-ci est basée sur l'alignement de la phase. Cet exemple montre que, l'algorithme pouvant estimer la dispersion à partir de seulement deux capteurs, il est plus efficace que les méthodes classiques multi-capteurs.

Afin de comparer notre résultat avec la méthode classique $1D$ basée sur la représentation temps-fréquence de chaque trace, on présente figure 16 le scalogramme réalloué d'une trace, et le résultat de l'image d'amplitude obtenue avec notre algorithme. Les résultats sont similaires, mais le scalogramme réalloué est plus bruité. Ceci montre que la méthode classique est plus sensible au bruit que notre méthode.

4.2. Deuxième jeu de données

Nous considérons un second jeu de données fourni par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG). Le profil est présenté sur la figure 17(a) en temps-distance. L'analyse en fréquence figure 17(b) permet d'observer une onde énergétique. L'analyse des scalogrammes sur la figure 18 permet aussi de visualiser l'onde énergétique au centre ainsi que deux autres ondes : une à la coordonnée (110,0.07) et une basse fréquence. Les géophysiciens s'intéressent à l'onde à droite.

Afin de comparer, nous avons tracé sur la figure 19 les images d'amplitude et de phase calculées avec l'algorithme proposé. Les

trois ondes sont visibles. En comparaison avec le scalogramme et le scalogramme réalloué, l'image d'amplitude est moins bruitée, et l'image de dispersion témoigne de la présence d'une onde du fait de la cohérence de l'image en ce point.

Par la suite, l'onde énergétique est extraite par filtre de vitesse et filtrage temps-fréquence (voir figure 17(c) et (d)). Sur les figures 17(e) et (f), il apparaît que l'onde faible à droite sur les représentations temps-fréquence n'était pas visible sur les images de module de la TF2D car son motif en fréquence est superposé au motif de l'onde énergétique au point $(-0.35, 0.08)$. Ceci explique la présence d'oscillations sur la figure 17(b) en ce point. En conclusion, sur cet exemple, l'image en fréquence (TF2D) ne permet pas de détecter l'onde de faible énergie car elle se déplace avec la même vitesse que l'onde énergétique. La méthode $1D$ fonctionne, mais le bruit qui l'affecte rend son application délicate. La représentation proposée révèle une information plus complète.

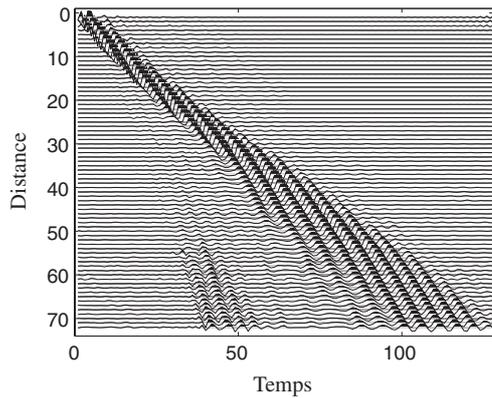
5. Conclusion

Un nouvel algorithme estimant la dispersion d'une onde à partir d'un réseau linéaire de capteurs a été présenté. La méthode proposée est basée sur la construction d'une représentation temps-fréquence contenant les différentes ondes telles qu'elles apparaissent sur le dernier capteur. Par rapport aux représentations temps-fréquence classiques, l'intérêt est que notre procédé est basé sur une analyse multi-capteur, ce qui permet de favoriser les ondes se propageant à une vitesse donnée. De plus, par rapport aux méthodes multi-capteurs classiques, l'avantage est que nous disposons d'une résolution temporelle. Ainsi, notre algorithme permet la séparation des différentes ondes sismiques présentes sur un profil, y compris lorsque celles-ci ont des vitesses de propagation similaires ou des supports temporels non joints. Ceci constitue un avantage sur les méthodes classiques qui sont mises en défaut par l'une ou l'autre de ces situations.

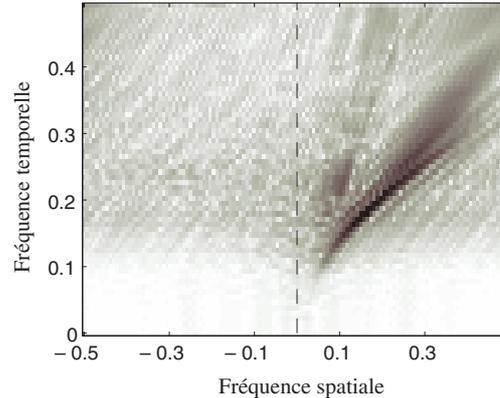
Les méthodes mono-traces basées sur des représentations temps-fréquence ne peuvent pas gérer le cas de supports temporels qui se chevauchent et les méthodes basées sur la représentation fréquence-vitesse du profil entier ne peuvent pas séparer des ondes de même vitesse.

L'algorithme proposé a été testé et validé sur des données réelles. Les résultats ont été favorablement comparés à ceux produits par les méthodes classiques. Cependant, d'un point de

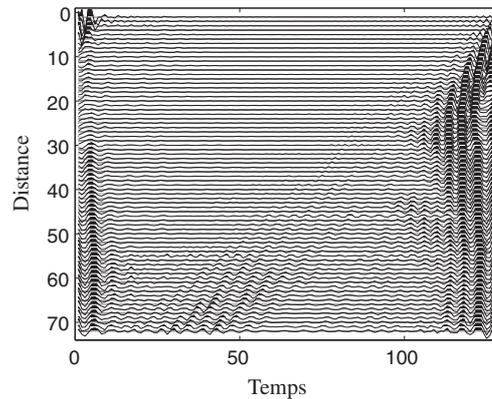
vue opérationnel, il convient néanmoins de souligner que la méthode proposée requiert un nombre de calculs plus important que les méthodes classiques (*TF2D*): l'estimation de la dispersion requiert en effet l'estimation de deux paramètres (retard et déphasage) contre un seulement pour les méthodes classiques. Pour réduire ce problème, il faudrait mettre en oeuvre une optimisation des calculs afin d'estimer plus rapidement les différents paramètres, ou utiliser de l'information *a priori*.



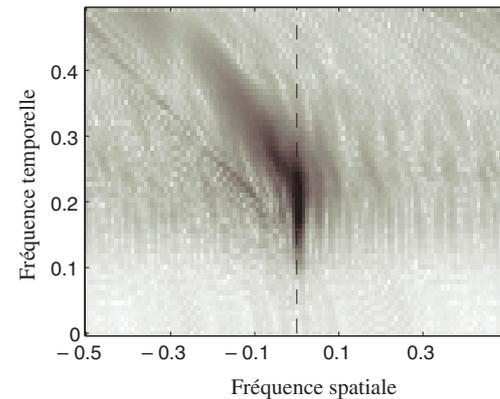
(a) Profil initial.



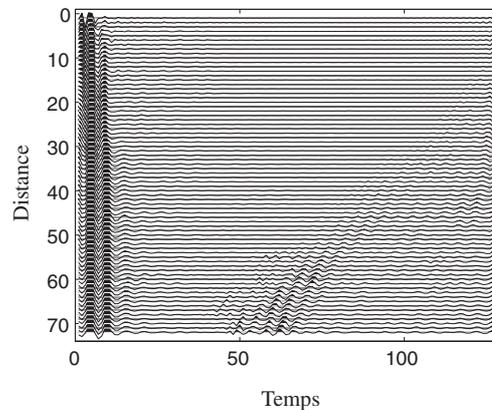
(b) $|TF2D|$ de (a).



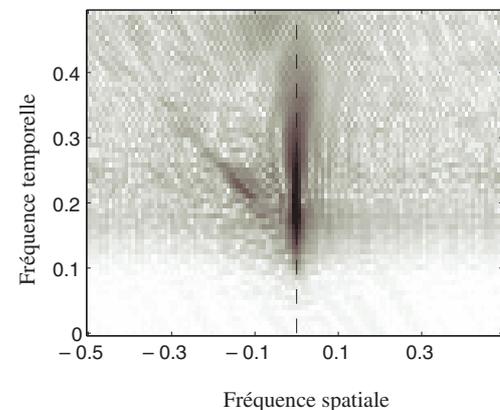
(c) Profil corrigé (méthode standard).



(d) $|TF2D|$ de (c).



(e) Profil corrigé (méthode proposée).



(f) $|TF2D|$ de (e).

Figure 15. Correction de la dispersion d'une onde de Love avec la méthode standard (Fourier) (c) et (d), et avec la méthode proposée (e) et (f).

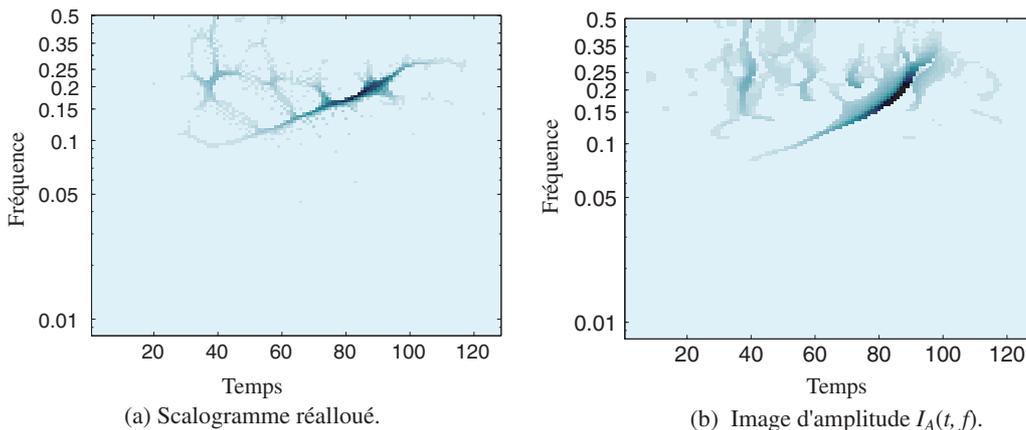


Figure 16. Comparaison entre un scalogramme réalloué (à gauche) et l'image d'amplitude obtenue par la méthode proposée (à droite).

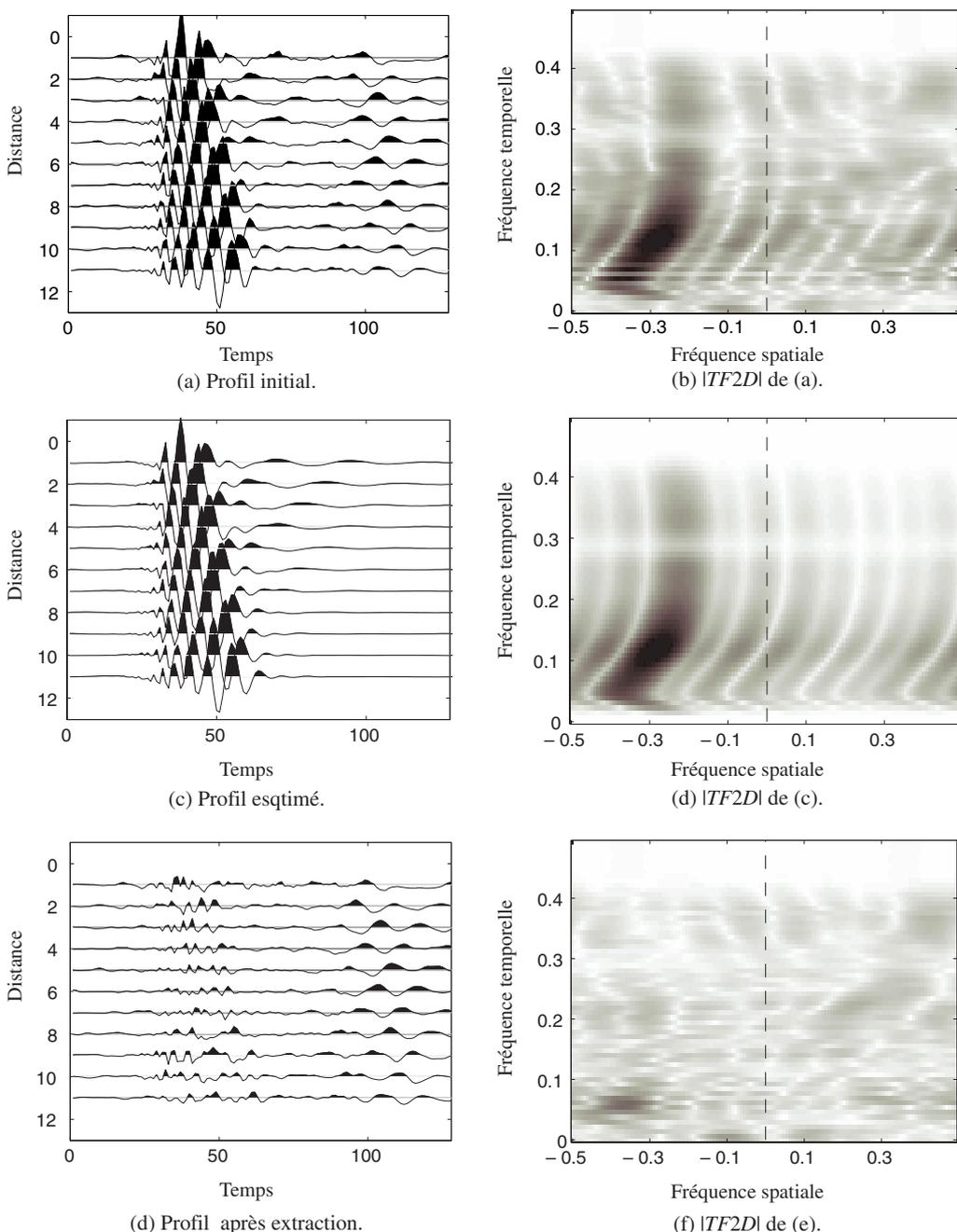


Figure 17. Estimation et extraction d'une onde dispersive. Ce jeu de données a été fourni par la Compagnie Générale de Géophysique.

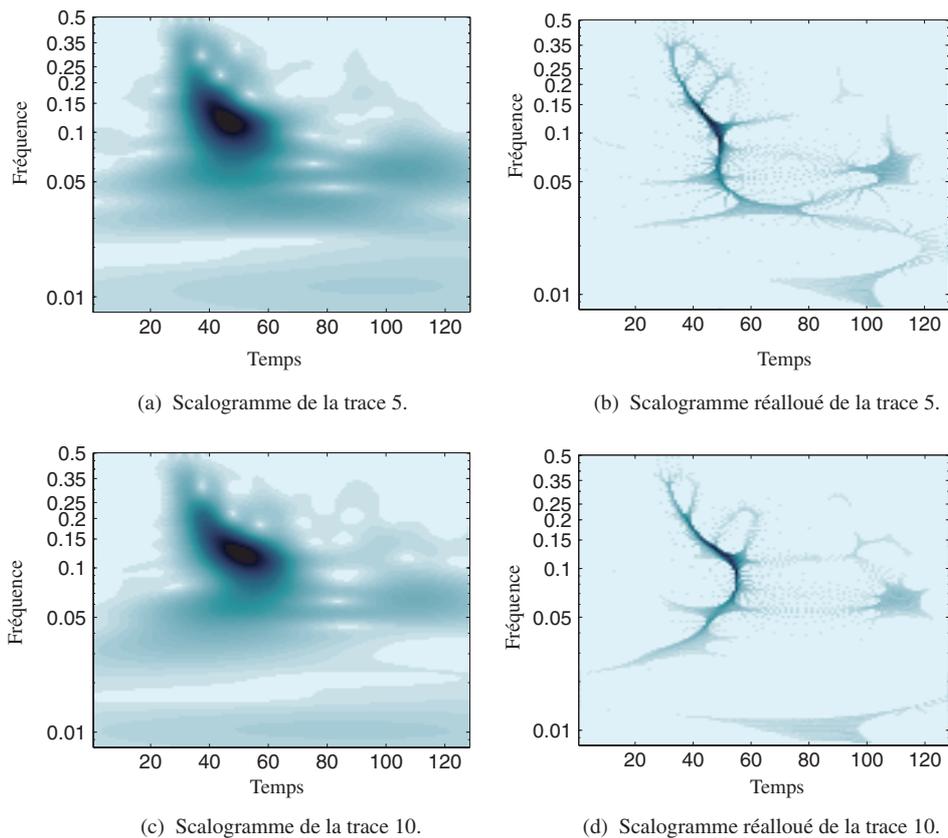


Figure 18. Représentations temps-fréquence (classiques) des traces 5 et 10 du profil présenté figure 17(a).

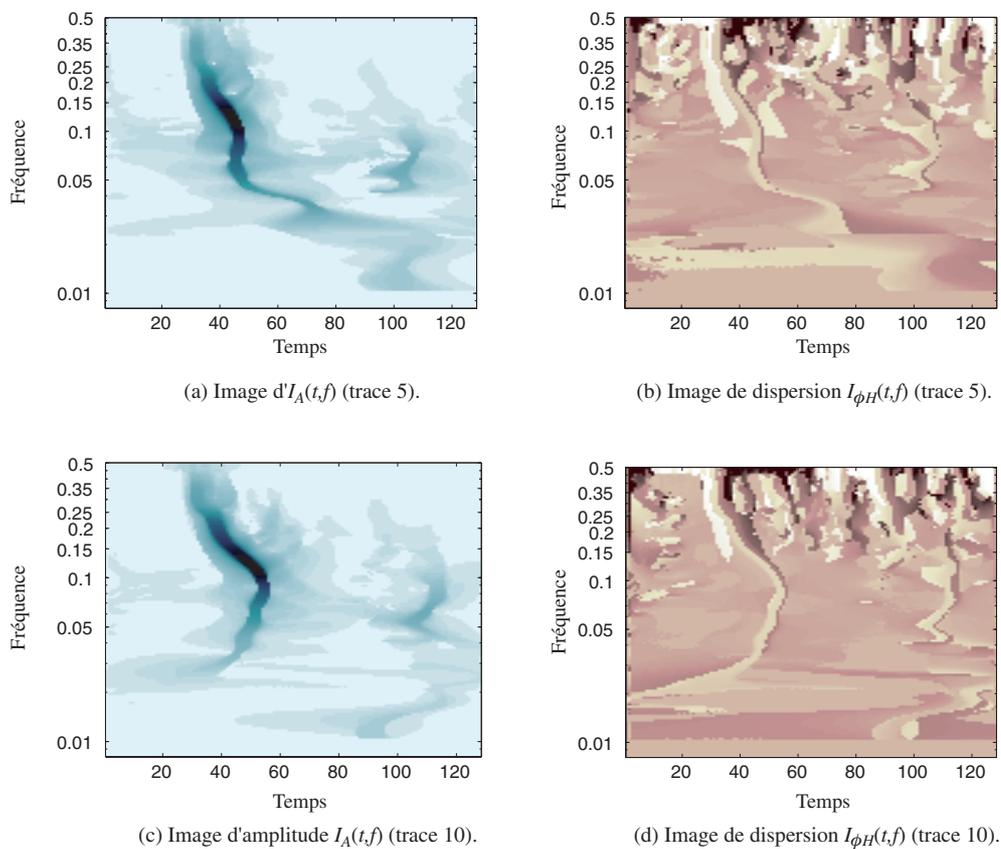


Figure 19. Représentations temps-fréquence (par la méthode proposée) des traces 5 et 10 du profil présenté figure 17(a), l'amplitude à gauche et la phase à droite.

Références

- [Baraniuk01] R.G. BARANIUK, M. COATES et P. STEEGHS, Hybrid linear/quadratic time-frequency attributes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, n° 4, 2001, pp. 760-766.
- [Boashash92] B. BOASHASH, Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal-part 1 : Fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, n° 4, 1992, pp. 519-538.
- [Chakraborty95] A. CHAKRABORTY et D. OKAYA, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods. *Geophysics*, vol. 60, n° 6, 1995, pp. 1906-1916.
- [Dietrich88] M. DIETRICH, Modeling of marine seismic profiles in the $t - x$ and $t - p$ domains. *Geophysics*, vol. 53, n° 4, 1988, pp. 453-465.
- [Dziewonski69] A. DZIEWONSKI, S. BLOCH et M. LANDISMAN, A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 59, n° 1, 1969, pp. 427-444.
- [Flandrin98] P. FLANDRIN, *Temps-Fréquence*, Hermès, Paris, 1998.
- [Glangeaud99a] F. GLANGEAUD, *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens. Techniques avancées*, chap. les Ondes dispersives, Ed Technip, Paris, 1999 volume 3.
- [Glangeaud99b] F. GLANGEAUD, J.L. MARI, J. MARS et M. NARDIN, Dispersive seismic waves in geophysics. *European Journal of environmental and engineering geophysics*, vol. 3, 1999, pp. 265-306.
- [Mari97] J.L. MARI, F. GLANGEAUD et F. COPPENS, *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens*, Ed Technip, Paris, 1997.
- [Mcmechan81] G. A. MCMECHAN et M. J. YEDLIN, Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, vol. 46, n° 6, 1981, pp. 869-874.
- [Morlet82] L. MORLET, G. ARENS, E. FOURGEAU et D. GIARD, Wave propagation and sampling theory, 1, complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, vol. 47, n° 2, 1982, pp. 203-221.
- [Pedersen03] H. A. PEDERSEN, J.I. MARS et P.O. AMBLARD, Improving group velocity measurements by energy reassignment. *Geophysics*, vol. 68, n° 2, 2003, pp. 677-684.
- [Shapiro99] N. SHAPIRO et S.K. SINGH, A systematic error in estimating surface-wave group velocity dispersion curves and a procedure for its correction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89, 1999, pp. 1138-1142.
- [Stocker03] T. STÖCKER, Weyl filters for linear array data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, n° 3, 2003, pp. 697-707.
- [Yilmaz87] O. YILMAZ, *Seismic Data Processing*, Society of Exploration Geophysicists (SEG), 1987.





Antoine **Roueff**

Diplômé Ingénieur en Génie Electrique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble en 2000 (ENSIEG / INPG), Antoine Roueff a effectué une thèse portant sur le développement d'approches multi-composantes pour le traitement des signaux sismiques dans le plan temps-fréquence au Laboratoire des Images et des Signaux (LIS) de l'INPG. Après cette thèse soutenue en 2003, il a intégré le laboratoire de Détection et Sismologie Opérationnelle (DSO) au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA / DASE) pour y effectuer un stage post-doctoral. Dans le cadre de la surveillance de l'environnement, ses recherches portent principalement sur le développement et l'application d'opérateurs de traitement du signal et du traitement d'images pour la détection, et la classification d'évènements hydroacoustiques.



Jérôme **Mars**

Jérôme Mars a obtenu un Master-Recherche de Géophysique en 1986 de l'Université Joseph Fourier (UJF, Grenoble) et un Doctorat en Traitement du Signal en 1988 de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG). De 1989 à 1992, il a effectué un séjour post-doctoral au Centre d'Etude des PHénomènes Aléatoires et Géophysiques (CEPHAG) de Grenoble. De 1992 à 1995, il était professeur invité et chercheur au Materials Sciences and Mineral Engineering Department de l'Université de Berkeley, Californie. Il est actuellement maître de conférences en traitement du signal à l'INPG et effectue ses recherches au Laboratoire des Images et des Signaux (LIS). Ses centres d'intérêt incluent le traitement de signaux sismiques et acoustiques, les méthodes de séparation d'ondes, l'analyse temps-échelle et temps-fréquence et la géophysique appliquée. Jérôme Mars est titulaire d'une Habilitation à Diriger des Recherches et est responsable de l'équipe Signaux et Images dans les milieux Naturels (SIN) au sein du LIS. Il est membre de la Society of Exploration and Geophysicists (SEG) et de l'European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE).



Jocelyn **Chanussot**

Diplômé Ingénieur en Génie Electrique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble en 1995 (ENSIEG / INPG), Jocelyn Chanussot a effectué une thèse portant sur le développement d'approches vectorielles et marginales pour le traitement d'images multi-composantes au Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC) de l'Université de Savoie à Annecy. Après cette thèse soutenue en 1998, il a intégré le laboratoire Géographie, Imagerie Perception (GIP) du Centre Technique d'Arcueil (DGA / CTA). Depuis 1999, il est maître de conférences à l'INPG et effectue ses recherches au Laboratoire des Images et des Signaux (LIS) au sein de l'équipe Signaux et Images dans les milieux Naturels (SIN). Ces « milieux naturels » concernent aussi bien le sous sol (signaux sismiques), le milieu marin (signaux sonar à synthèse d'ouverture) que le ciel (télédétection satellitaire). Dans ce cadre général, ses recherches portent principalement sur le développement et l'application d'opérateurs de traitement d'images en liaison avec l'application.



Helle Anette **Pedersen**

Helle Anette Pedersen a obtenu son doctorat de géophysique de l'Université Joseph Fourier de Grenoble en 1994 et l'Habilitation à Diriger des Recherches en 2002. Elle est actuellement Maître de Conférences à l'Université Joseph Fourier, au laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique. Elle est spécialisée dans le développement de méthodes de traitement et d'interprétation des ondes sismiques, notamment les ondes de surface. Les domaines d'application de ces méthodes ont pu l'amener à travailler à des échelles variées d'analyse entre l'auscultation non-destructif du béton, les effets d'amplification des sols jusqu'à l'investigation de la lithosphère terrestre.