

Ondelette	R
Daubechies, $N = 2$	12,47 dB
Daubechies, $N = 4$	9,46 dB
Daubechies, $N = 6$	10,81 dB
Daubechies, $N = 8$	9,99 dB
Spline	12,60 dB
Biorthogonale	12,67 dB

Tableau 4.1: Rapports signal à bruit pour différentes ondelettes pour $j = 2$.

nombre d'horizons ont été reconnectés par rapport à l'image initiale, ce qui explique l'impression de meilleure régularité. L'ondelette spline et l'ondelette de Daubechies à 8 moment nuls paraissent produire les horizons les plus réguliers, l'inconvénient de ces ondelettes restant le décalage.

Ondelette	S	nb horizons	n	longueur moyenne
Image originale	$5,19 \cdot 10^{-2}$	308	8841	30
Daubechies, $N = 2$	$5,16 \cdot 10^{-2}$	222	10508	48
Daubechies, $N = 4$	$5,28 \cdot 10^{-2}$	222	10665	49
Daubechies, $N = 6$	$5,49 \cdot 10^{-2}$	213	10743	51
Daubechies, $N = 8$	$5,57 \cdot 10^{-2}$	208	10812	53
Spline	$5,06 \cdot 10^{-2}$	213	11163	53
Biorthogonale	$5,16 \cdot 10^{-2}$	246	11298	47

Tableau 4.2: Caractéristiques des horizons détectés à partir de différentes ondelettes pour $j = 2$.

Un traitement à différentes échelles permet de mettre en valeur les horizons ayant des tailles différentes. Ainsi, pour une petite échelle, les horizons de tailles faibles sont prépondérants, alors que pour une échelle plus grande, ce sont les horizons plus épais (Fig. 4.24).

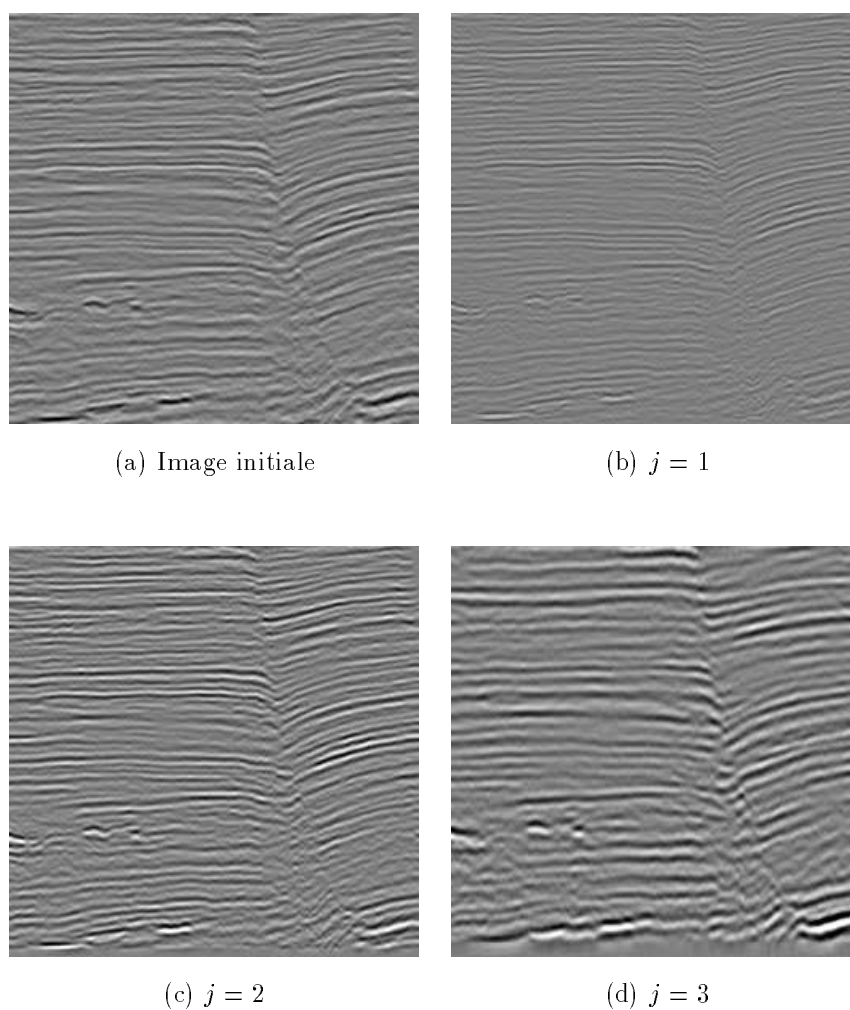


Figure 4.24: *TO pour plusieurs échelles avec l'ondelette de Daubechies à 2 moments nuls*

4.3.3.2 Ondelette sismique

L'ondelette sismique est obtenue par le procédé exposé précédemment à partir d'une trace de l'image présentant de belles réflexions (horizons bien marqués) de telle manière que le calcul soit le plus précis possible. L'ondelette obtenue est ensuite normalisée en norme ℓ^2 . La fonction d'échelle est déterminée par le filtre à trous h suivant : $h = \frac{1}{\sqrt{2}}(-\frac{1}{16}, 0, \frac{9}{16}, 1, \frac{9}{16}, 0, -\frac{1}{16})$. On est ainsi assuré que la transformée en ondelettes calculée est la transformée en ondelettes de l'ondelette sismique échantillonnée.

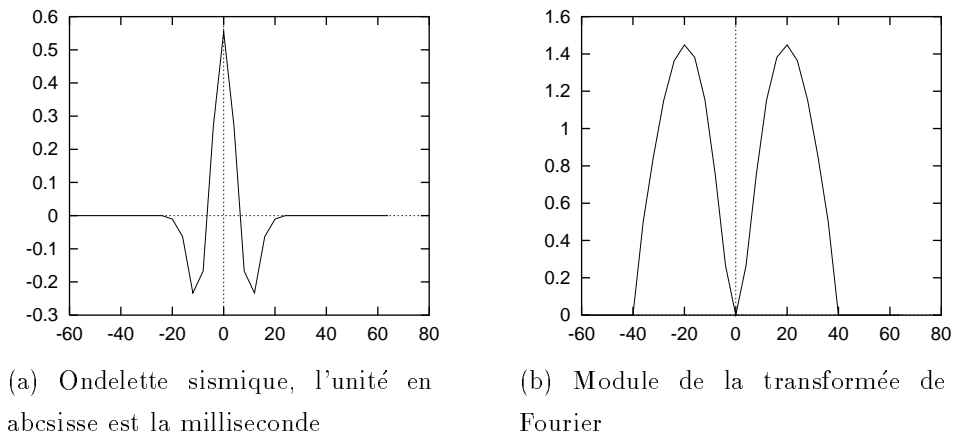


Figure 4.25: Exemple d'ondelette obtenue avec l'image présentant une faille

On observe à l'aide de la figure 4.26 que pour $j = 1$, le signal traité est presque le même que le signal original mise à part que les réflexions importantes sont réhaussées ce qui était le but du traitement.

L'image formée par la TO par l'algorithme à trous pour $j = 1$ ressemble fortement à l'image initiale, le rapport signal à bruit étant beaucoup plus élevé qu'avec les autres ondelettes (Tab. 4.3). On voit de plus beaucoup moins de structures dans l'image de différence, les horizons principaux étant tout de même réhaussés (Fig. 4.27). Ceci est du au fait qu'il n'y a pas de décalage.

Ondelette	R	S	nb d'horizons	n	longueur moyenne
Ondelette sismique	18, 5709 dB	5, 12 10^{-2}	236	9365	41

Tableau 4.3: Caractéristiques calculées sur l'image traitée par l'ondelette sismique, pour $j = 1$.

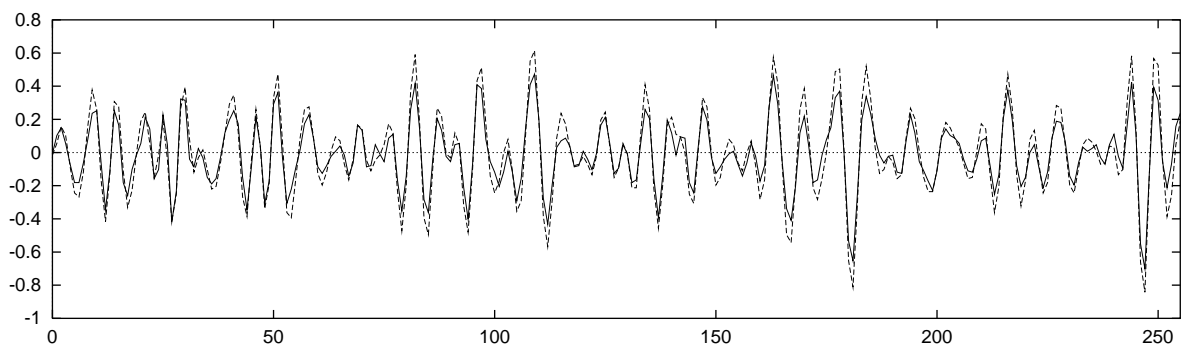
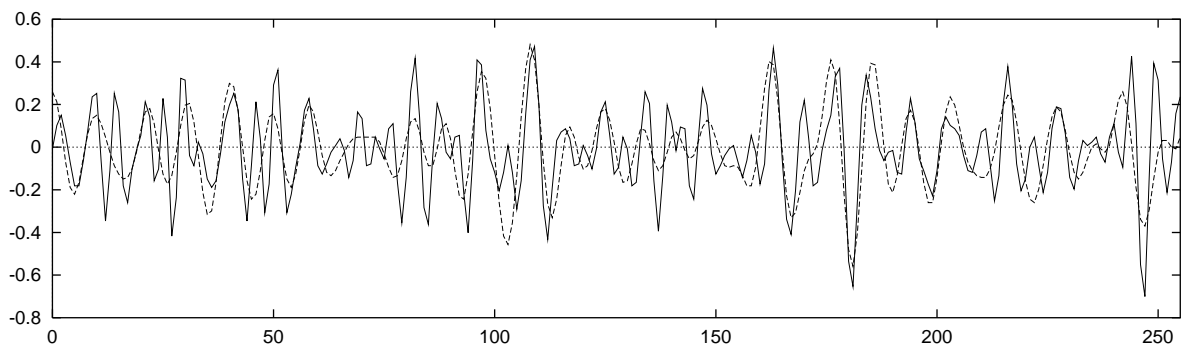
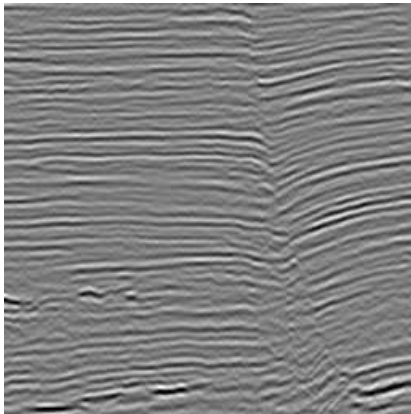
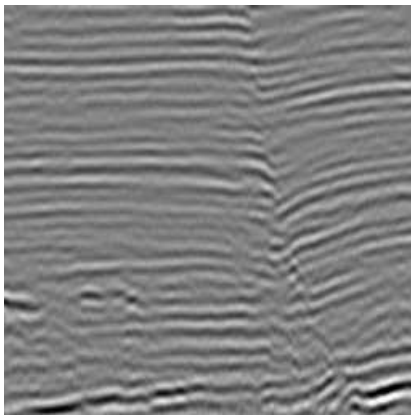
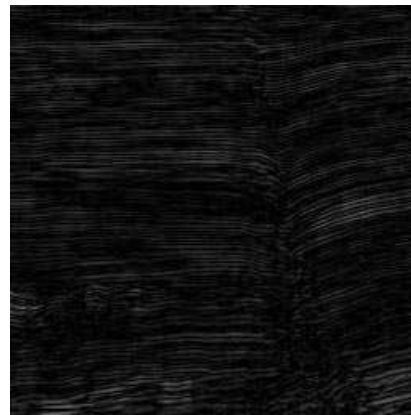
(a) $j = 1$ (b) $j = 2$,

Figure 4.26: Comparaison trace originale (en trait plein) et trace traitée (en pointillés) par l'ondelette sismique

(a) Ondelette sismique, $j = 1$.(b) Image de différence, $j = 1$.(c) Ondelette sismique, $j = 2$.(d) Image de différence, $j = 2$.Figure 4.27: *TO pour l'ondelette sismique calculée sur la trace 50*

Les horizons détectés à partir d'une image traitée sont un peu moins lisses qu'avec un traitement par ondelette mathématique, mais on observe une nette amélioration par rapport à l'image initiale (Fig. 4.28, Tab. 4.3). De plus on est certain dans ce cas que les horizons détectés sont bien localisés.

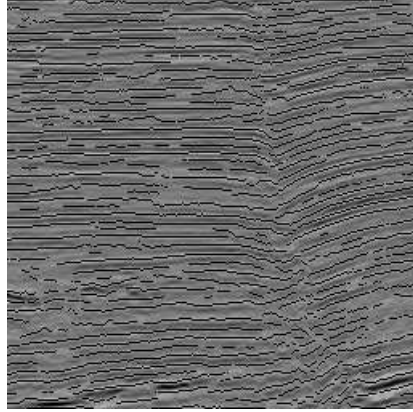


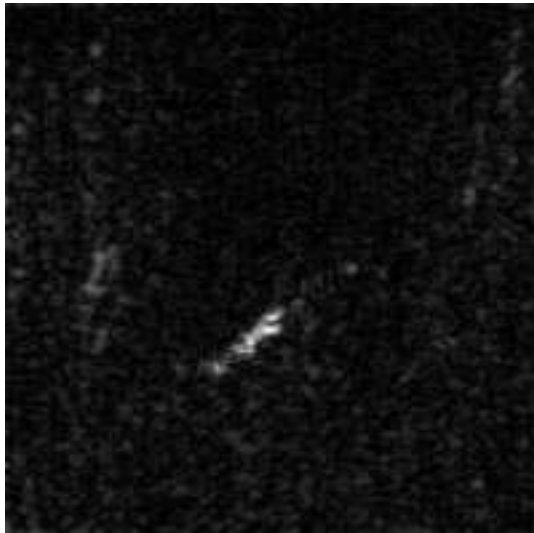
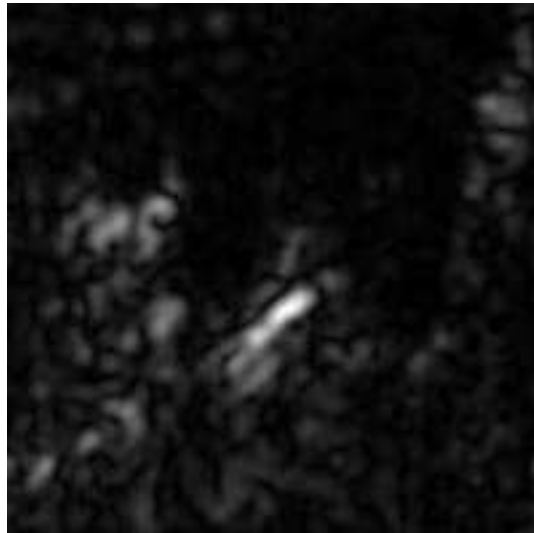
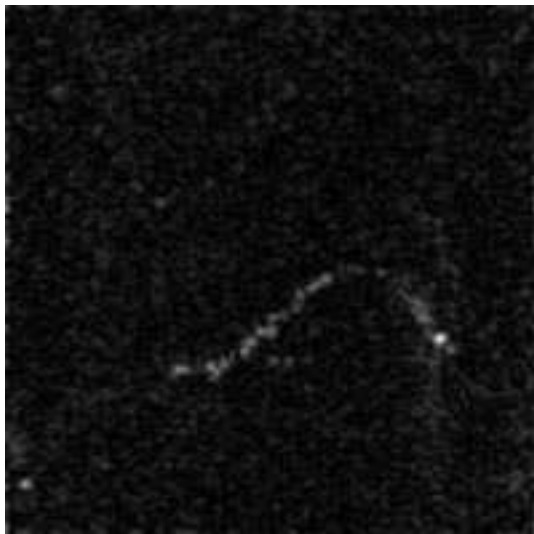
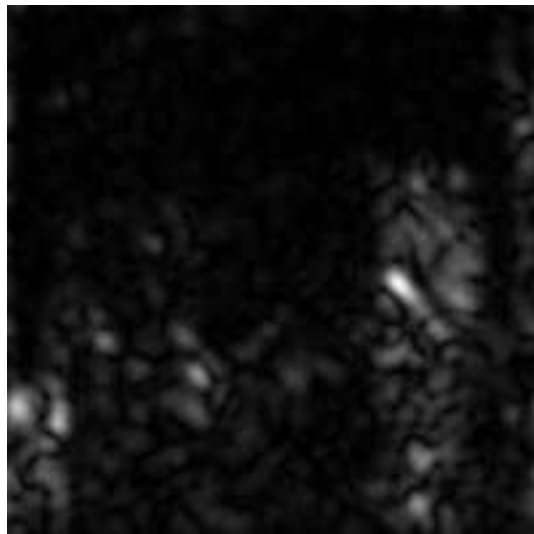
Figure 4.28: *Horizons obtenus à partir de l'image traitée par l'ondelette sismique pour $j = 1$.*

4.4 Analyse par ondelettes directionnelles

Nous allons voir dans ce paragraphe comment la transformée en ondelettes directionnelles peut être appliquée aux images sismiques. Nous utilisons ici la transformée en ondelettes continue contrairement au paragraphe précédent. Pour les images dont les dimensions sont en puissances de 2, nous appliquerons la formule de la TO utilisant les transformées de Fourier (équation 2.1) de telle manière à avoir un algorithme rapide. Une des applications les plus importantes aboutit à la détection de failles.

4.4.1 Détection de zones ayant une direction privilégiée

Nous avons vu au paragraphe 4.1.1 que certaines séquences sismiques étaient constituées d'horizons ayant une même direction. De telles zones peuvent être mises en valeur par la transformée en ondelettes directionnelles appliquée dans la direction des horizons, θ . Cependant, l'ondelette ayant une certaine qualité directionnelle α , les zones détectées seront celles ayant une direction entre les angles $\theta - \alpha$ et $\theta + \alpha$.

(a) $\theta = \frac{\pi}{4}$, $a = 0,2$ (b) $\theta = \frac{\pi}{4}$, $a = 0,5$ (c) $\theta = -\frac{\pi}{4}$, $a = 0,2$ (d) $\theta = -\frac{\pi}{4}$, $a = 0,5$ Figure 4.29: *TO pour plusieurs paramètres à partir de l'image 4.10.*

On voit un exemple d'une telle application sur la figure 4.29. On cherche ici à mettre en valeur des structures. Comme on l'a vu précédemment, l'ondelette de Morlet est l'ondelette la plus adaptée. L'échelle ne doit pas être trop petite : on va en effet alors détecter les discontinuités dans la direction choisie (images (a) et (c)) alors que pour une échelle plus grande, on met en valeur les zones où les horizons ont cette direction (images (b) et (d)).

Cette application doit être vue comme une étape en vue d'une segmentation et non une fin en soi. Ceci pourrait éventuellement être un outil supplémentaire à un système à bases de connaissances.

4.4.2 Détection de failles

4.4.2.1 Introduction

Une faille dans la réalité est une rupture de couches de roches. Comment cela se traduit-il sur les images sismiques? Au niveau d'une faille, le signal sismique se réfléchit de manière très désordonnée. Ceci se traduit par une anomalie d'amplitude ou de pendage dans un horizon et parfois une rupture de cet horizon (voir Fig. 4.8). Une faille sera donc un alignement de singularités des horizons.

Le problème de détection fiable de faille est un problème difficile et peu étudié. En effet, les failles sont des objets difficiles à définir avec les outils robustes habituels de traitement d'image (frontières, zones homogènes, etc...). L'œil les perçoit comme une répétition d'un même événement (singularité dans les horizons). Cette constatation a conduit J.P. Cocquerez et al. [16] [36] à utiliser une méthode dite de *regroupement perceptuel* d'inspiration neurobiologique permettant de détecter efficacement des contours virtuels. Cette méthode utilise des fonctions de Gabor permettant d'extraire des points caractéristiques appartenant aux failles, puis, par une méthode de diffusion, les failles proprement dites sont détectées. Cette méthode paraît très prometteuse mais détecte parfois des failles fantômes.

4.4.2.2 Méthode

Notre méthode se base sur le fait qu'une faille est un alignement de singularités, ce qui est tout à fait propice à la transformée en ondelettes. Cependant, il n'existe pas uniquement ces singularités dans l'image. En effet un horizon peut se voir comme une ligne blanche ayant une frontière avec la couche de roche de dessus et celle de dessous.

Cette frontière constitue donc aussi une singularité de la fonction f qu'est l'image. Il faut alors remarquer que ces frontières ont en général une direction privilégiée, θ_h , comprise entre θ_{min} et θ_{max} . Si on applique la transformée en ondelettes directionnelle avec une direction θ telle que $\theta > \theta_{max} + \alpha_\varepsilon$ ou $\theta < \theta_{min} - \alpha_\varepsilon$ où α_ε est le critère de qualité directionnelle de l'ondelette choisie, alors les singularités "frontières" n'auront aucune réponse alors que les singularités "failles" en auront une comme nous l'avons montré au chapitre précédent. Un horizon était modélisé par une "barre", une singularité "faille" étant le bord vertical de la barre et les singularités "frontières" étant les bords horizontaux. Par cette méthode, nous aurons en quelque sorte filtré l'image ne gardant que les éléments qui nous intéressent. Il faudra ensuite détecter les failles proprement dites. Il apparaît plus naturel d'effectuer un suivi de maximum plutôt qu'un passage par 0, comme nous le verrons par la suite. L'ondelette utilisée doit donc fournir un TO dont le module est maximum sur les discontinuités. On a choisi l'ondelette de Morlet pour sa qualité directionnelle.

Choix de l'échelle

Dans la majeure partie des cas, on peut considérer que les singularités se situant sur les failles sont des discontinuités de la fonction. On doit donc, comme on l'a montré dans le chapitre précédent, utiliser un facteur d'échelle le plus petit possible pour plus de précision.

Il ne faut pas oublier qu'une image est constituée de données discrètes. Si théoriquement a peut tendre vers 0, en pratique, il existe une valeur limite a_{min} au-delà de laquelle a n'a plus de signification réelle. C'est ce qu'on a appelé *facteur d'échelle minimal* au paragraphe 2.1.4. On rappelle que pour une ondelette unidimensionnelle

$$a_{min} = \frac{N_{min}}{N_1}$$

où N_1 est le nombre de points de discrétisation de l'ondelette mère et N_{min} , le nombre minimal de points de discrétisation souhaité.

L'ondelette de Morlet utilisée ici est bidimensionnelle. Cependant, on a choisi comme bon compromis de localisation spatiale et temporelle, l'ondelette dont le module est isotrope, c'est-à-dire que $\mu = 1$. On va donc considérer que le facteur d'échelle minimal correspond à celui de l'ondelette de Morlet unidimensionnelle. Celle-ci s'écrit

$$\Psi_M(y) = \cos(k_0 y) e^{-\frac{y^2}{2}} + i \sin(k_0 y) e^{-\frac{y^2}{2}}$$

Nous allons considérer que le minimum de points de discrétisation correspond à un point sur chaque extremum local de la partie réelle ou de la partie imaginaire de la

fonction. Considérons la partie réelle. Celle-ci est extrémale pour $y = \frac{l\pi}{k_0}$ avec $l \in \mathbb{Z}$. Soit $[-x_0, x_0]$ le support principal à ε près de l'ondelette de Morlet. Calculons le nombre d'extrema N_{min} présents dans ce support.

$$-x_0 \leq \frac{l\pi}{k_0} \leq x_0$$

Soit

$$N_{min} = \lfloor \frac{x_0 k_0}{\pi} \rfloor - \lceil -\frac{x_0 k_0}{\pi} \rceil + 1$$

Si $\varepsilon = 10^{-2}$ alors $x_0 = 3,03$ et pour $k_0 = 7$, $N_{min} = 15$. Or on a choisi $N_1 = 84$. D'où $a_{min} = 0,18$. Pour être sûrs d'avoir une ondelette bien décrite, on prendra un facteur d'échelle légèrement supérieur, c'est-à-dire, $a = 0,2$.

Choix de l'angle

On a vu que l'angle de la transformée en ondelette devait être choisi supérieur ou inférieur aux directions existant dans l'image, c'est-à-dire $\theta > \theta_{max} + \alpha'_\varepsilon$ ou $\theta < \theta_{min} - \alpha'_\varepsilon$. On a vu dans le chapitre précédent que $\alpha'_\varepsilon = 0,3$. Or dans l'image que l'on cherche à traiter, ce qui est le cas de la plupart des images sismiques, $\theta_{max} \leq \frac{\pi}{4}$. Par conséquent, un angle θ supérieur à $1,085$ convient parfaitement. Il est évident que plus l'angle est proche de la direction de la faille, meilleure sera la précision. La figure 4.31 nous montre le module de la TO de l'image 4.8 pour plusieurs angles. Dans chaque image ((a),(b) et (c)) on peut remarquer un alignement de maxima le long des failles. Cependant la précision est la meilleure pour $\theta = 1,75$ qui est l'angle le plus proche de la direction globale des failles. C'est donc sur cette image qu'on fera la détection.

Algorithme de détection

On a dit précédemment qu'il était plus naturel pour la détection de failles d'utiliser un algorithme de suivi de maximum plutôt qu'une méthode dite des passages à zéro. En effet, localement, une faille peut se présenter comme le montre la figure 4.30.

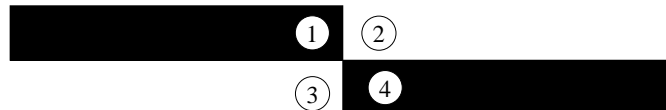


Figure 4.30: Un cas possible de rupture d'horizon au voisinage d'une faille.

La transformée en ondelettes sera positive dans les zones 1 et 4 et négative dans les zones 2 et 3. Les passages par 0 seront donc sur la faille mais également sur les

frontières entre les zones 1 et 3 et entre les zones 2 et 4. Et ces derniers points ne doivent pas être pris en considération. L'utilisation d'une ondelette telle que l'ondelette de Morlet évite ce genre de problèmes.

L'algorithme de suivi de maximum choisi doit être bien adapté au cas envisagé. On remarque sur la figure 4.31(a) que la TO fournit bien un alignement de maxima le long des failles. Cependant, cet alignement n'est pas continu. A quoi cela est-il dû? Il existe, dans l'image sismique initiale, des zones homogènes sans horizons correspondant à un même dépôt géologique. Ces zones ne présentent donc pas de discontinuité au niveau de la faille. On rencontre encore des zones où deux horizons se reconnectent et là encore la TO est nulle.

Les suivis de maximum exposés précédemment pour la détection d'horizons [45] [67] sont sensibles aux discontinuités. On a donc utilisé l'algorithme proposé par F. Jacquis [44] dans le cadre de la détection de structures dans les images radar où ces structures sont très fines et très bruitées et donc discontinues. Cet algorithme est très robuste au bruit (trous dans les structures) car la recherche de maximum se fait au moyen de segments et non pas point par point. On procède comme suit. On part du principe qu'on connaît un point appartenant à chaque structure ainsi que la direction globale de celle-ci (entre θ_1 et θ_2). On cherche ensuite quel segment de longueur L de direction θ compris entre θ_1 et θ_2 a une moyenne sur l'ensemble de ses points maximale. Le point suivant de la structure est le point dans cette direction θ . Le paramètre L doit être fixé en fonction de la taille des trous dans la structure et de la précision désirée. En effet, plus L est important plus la structure détectée sera rectiligne.

Dans le cas de la détection de failles les points d'initialisation sont les brights spots qui correspondent également à des points brillants dans l'image de la TO (ce sont des discontinuités importantes). Sur les cas considérés, une faille est globalement verticale, c'est-à-dire que si θ_1 et θ_2 sont mesurés par rapport à la verticale, $\theta_1 = -\frac{\pi}{4}$ et $\theta_2 = \frac{\pi}{4}$.

On voit que cette méthode est très précise pour la localisation des failles (Fig. 4.31(d)). Cependant la détection n'est pas fiable dans des zones très bruitées comme le sont les zones sourdes (bas de l'image). En effet, ces zones se présentent comme une grande quantité de petits horizons dans toutes les directions et la TO aura une réponse non nulle dans ces zones quelque soit la direction envisagée. De plus une des failles n'a pas été détectée car la TO correspondante n'offrirait pas de points brillants sur cette faille et donc le processus d'initialisation n'a pu être effectué. Il convient donc d'appliquer un filtrage préalable à l'image de telle manière que le bruit de la zone sourde soit atténué