



HAL
open science

Diffusion et fusion directionnelles pour le lissage et le rehaussement de structures fortement orientées

Olivier Laviaille

► **To cite this version:**

Olivier Laviaille. Diffusion et fusion directionnelles pour le lissage et le rehaussement de structures fortement orientées. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2007. tel-00181793

HAL Id: tel-00181793

<https://theses.hal.science/tel-00181793v1>

Submitted on 24 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE

PRESENTE PAR

Olivier LAVIALLE

Pour obtenir l'

**HABILITATION À DIRIGER DES
RECHERCHES**

Diffusion et fusion directionnelles pour le lissage et le
rehaussement de structures fortement orientées : application à
l'imagerie sismique

2007

Sommaire

Préambule	5
Chapitre 1 : Diffusion directionnelle 2D.....	7
1.1 L'utilisation des EDPs pour l'amélioration d'image	7
1.2 Lissage directionnel 1D et 1D/2D	9
1.3 Diffusion Flux-Cohérence	19
1.4 Validation et applications des approches de diffusion directionnelle.....	22
Chapitre 2 : Diffusion directionnelle 3D pour la sismique.....	29
2.1 Problématique du filtrage en imagerie sismique	29
2.2 Filtre de diffusion sectorielle.....	32
2.3 Diffusion tensorielle pour la sismique.....	44
Chapitre 3 : Fusion par EDP	47
2.1 Sismique multi-azimutale.....	47
2.2 Fusion-Diffusion Sectorielle	48
2.3 Unification du processus de fusion-Diffusion.....	51
Conclusion et perspectives.....	57
Références bibliographiques	59
Liste des travaux et publications.....	65
Encadrement de la recherche	75
Exemplaires des travaux.....	77

Préambule

Les travaux que je présente ici concernent la dernière phase de mon parcours scientifique et en particulier les six dernières années, période au cours de laquelle une grande partie de mon activité de recherche a été dédiée à l'utilisation des Equations aux Dérivées Partielles pour le filtrage et le rehaussement d'images¹. Plus particulièrement, en nous intéressant à la classe des images texturées (2D et 3D), nous nous plaçons au cœur des thématiques académiques du Groupe Signal mais nous traitons également une problématique qui recouvre des domaines applicatifs principaux du Groupe Signal de l'UMR IMS : l'imagerie sismique et les matériaux composites.

La présentation est organisée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, je présenterai des méthodes *non linéaires et adaptatives* qui conduisent à de faibles modifications topologiques du signal utile. L'*amélioration* des images est obtenue par des approches originales permettant d'accentuer de manière uniforme et indépendante les variations locales de contraste et les structures unidimensionnelles avec ou sans *rehaussement de contours*. Nous présenterons en particulier deux types d'approches, l'une scalaire et l'autre tensorielle.

Ces travaux ont été initiés lors de la thèse de Romulus Terebes [T2]. Ils ont fait l'objet de deux publications en revue [A5][A10] et de neuf communications [C16-17][C19-20][C23][C28-29][C32][C53].

Dans le deuxième chapitre, nous adapterons ces méthodes aux spécificités de l'imagerie sismique en rapportant à la fois les travaux développés dans le cadre des thèses de Régis Dargent [T3] et de Sorin Pop [T4]. Outre l'extension au cas 3D, la problématique abordée a conduit à développer des approches structuralistes qui prennent en compte certaines informations a priori telles que la géométrie des failles. Là encore, nous présentons deux approches : la première relève tout autant du filtrage adaptatif que de la diffusion anisotrope, la seconde étant totalement inspirée d'une approche tensorielle.

Les travaux développés autour de la diffusion directionnelle pour la sismique ont fait l'objet de deux publications [A11][A14] et de quatre communications [C26][C27][C30][C34].

Enfin, la troisième partie présente une extension originale des EDP : dans le cadre des travaux de thèse de Sorin Pop, nous proposons l'utilisation d'une formulation à base d'Equations aux Dérivées Partielles pour mener conjointement une procédure de fusion d'image et une procédure de diffusion. Cette approche permet, à partir de plusieurs sources bruitées, l'obtention d'une sortie fusionnée et lissée. Ces travaux, qui sont encore à l'heure actuelle en cours de développement concernent à la fois des applications en fusion d'images rencontrées classiquement dans la littérature mais également une application 3D très particulière et assez nouvelle : la sismique azimutale. Nous en développerons les grands principes.

En 2007, ces travaux ont fait l'objet d'une communication dans 3 conférences internationales [C38][C39][C40], d'un article accepté [A16] ; un article est en préparation pour la revue "Journal of Advances in Information Fusion".

¹ Les travaux concernant les activités de recherche antérieures à 2001 ainsi que les autres travaux de recherche, de développement, de transferts et de soutien à d'autres équipes de recherche dans le domaine des statistiques font l'objet d'une présentation dans le document de synthèse.

Chapitre 1 : Diffusion directionnelle 2D

1.1 L'utilisation des EDPs pour l'amélioration d'image

Les méthodes non-linéaires sont considérées comme des outils puissants dans le domaine de traitement du signal et de l'image. Les avancées technologiques en termes de vitesse de calcul et de puissance ont permis l'implémentation pratique d'algorithmes plus complexes pouvant s'affranchir des limitations inhérentes aux approches invariantes linéaires. L'application des méthodes non linéaires au lissage avec préservation de contours, au rehaussement de contours ou encore à la segmentation des images montre de façon évidente leur supériorité. Parmi ces approches, nous nous intéresserons à celles qui s'appuient sur l'utilisation d'équations aux dérivées partielles (EDP) non linéaires.

En nous plaçant dans le cadre de l'amélioration d'une image en niveaux de gris, la formulation par EDP implique classiquement la modélisation de l'image par un ensemble discret de points (*pixels*). En considérant la luminance comme une fonction des coordonnées spatiales (x,y) et du temps t , les propriétés de l'image restaurée sont obtenues au travers d'une EDP ayant comme arguments la fonction luminance et ses dérivées partielles ; la solution de cette EDP, à un certain instant t , représente l'image restaurée (améliorée).

Soit $U_0 : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$ l'image à traiter où $U_0(x, y)$ est le niveau de gris associé au pixel de coordonnées (x,y) . Le modèle général d'évolution de l'image peut être mis sous la forme [Cas98]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = F(U(x, y, t)) \quad (1)$$

Cette écriture très générale s'appuie sur l'opérateur F spécifique de l'algorithme et lié à l'image originale et à ses dérivées spatiales première et seconde.

$U(x, y, t) : \mathbf{R}^2 \times [0, \tau] \rightarrow \mathbf{R}$ représente l'état de l'image résultat à un instant t . Finalement, la solution de l'équation (1) n'est autre qu'une version simplifiée de l'image originale correspondant à un temps d'évolution donné (i.e. à une échelle donnée). Au fur et à mesure de l'évolution temporelle, la transformation de l'image U_0 conduit à la réduction du bruit (et/ou au rehaussement du signal) tout en conservant l'information pertinente.

Dans la formulation EDP, le temps peut être assimilé à une échelle d'observation et par suite, les méthodes assimilées à des outils d'analyse multi-échelle définis par une famille de transformations $(T_t)_{t \geq 0}$ qui, appliquées à une image originale U_0 , donne une famille d'images dépendantes du paramètre t . Les propriétés nécessaires pour une analyse multi échelle ont été énoncées formellement par Morel [Mor95].

La représentation des images sous la forme d'un lissage multi-échelle a été introduite par Marr et Hildreth [Mar80], Witkin [Wit83] et développée ensuite par Koenderink [Koe84]. La méthode proposée par Witkin permet d'obtenir des images à des échelles de plus en plus

grossières en réalisant une suite de convolutions entre l'image originale et des noyaux Gaussiens de taille σ croissante.

Koenderink [Koe84] a démontré l'équivalence entre la solution de l'EDP de diffusion de la chaleur à un temps t et la convolution avec un noyau Gaussien d'écart type $\sqrt{2t}$. Cette équation de diffusion linéaire s'exprime sous la forme d'une divergence :

$$\begin{cases} U(x, y, 0) = U_0(x, y) \\ \frac{\partial U}{\partial t} = \text{div}[\nabla U(x, y, t)] \end{cases} \quad (2)$$

La méthode de lissage adaptatif avec rehaussement de contours de Perona et Malik [Per90] est peut être l'une des plus pertinentes dans le contexte dans la théorie de détection de contours. Pour la première fois, un formalisme EDP conduit à sélectionner une intensité de diffusion et donc une échelle de diffusion adaptée en fonction du voisinage. Pour cela, l'algorithme fait appel à une fonction de diffusion non-linéaire qui conduit à un lissage important dans les zones de faibles gradients et permet de limiter les effets de ce lissage sur le signal utile (contours).

Le principe de l'approche proposée par Perona et Malik consiste à introduire dans l'équation (2) un terme de conductivité c dépendant du contexte de local :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \text{div}[c(x, y, t)\nabla U(x, y, t)] \quad (3)$$

Pour obtenir le résultat recherché, la conductivité est définie comme une fonction décroissante, dépendante de la norme du vecteur gradient $c(x, y, t) = g(|\nabla U|)$. Les fonctions proposées initialement par Perona-Malik sont :

$$g(|\nabla U|) = \exp[-(|\nabla U|/K)^2] \quad (4)$$

$$\text{et } g[|\nabla U|] = \frac{1}{1 + \left[\frac{|\nabla U|}{K} \right]^2} \quad (5)$$

Le paramètre K appelé « seuil ou barrière de diffusion » permet de paramétrer la valeur du gradient à partir de laquelle le comportement de l'EDP varie entre diffusion et éventuel rehaussement.

Notons l'intérêt de l'interprétation directionnelle de la diffusion anisotrope : nous verrons que c'est à partir de cette interprétation que nous avons introduit le principe de la diffusion directionnelle 1D.

L'objectif est d'écrire l'équation en terme de dérivées secondes directionnelles dans la direction du gradient $\vec{\eta} = \left(\frac{U_x}{|\nabla U|}, \frac{U_y}{|\nabla U|} \right)^T$ et dans la direction orthogonale à celui-ci

$\vec{\xi} = \left(\frac{U_y}{|\nabla U|}, -\frac{U_x}{|\nabla U|} \right)^T$ qui sera assimilée à la direction des structures (Fig 1). U_x et U_y sont respectivement les dérivées de U en x et en y .

Cette notation, classique, est présentée dans [Der96], [Kri96], [Kor97] ou [Whi93]. Pour notre part, cette interprétation directionnelle est reprise dans [C16],[C19],[C28] et, dans le cas d'une extension 3D dans [C26] et [C30].

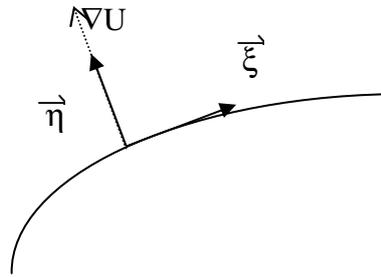


Fig 1- Direction du gradient et direction orthogonale.

En partant de l'équation de Perona et Malik, Rudin et al [Rud92] ont proposé un modèle de lissage fondé sur une minimisation d'énergie. L'EDP proposée, permet aussi l'élimination du bruit tout en préservant les contours. Alvarez, Lions et Morel [Alv92] ont proposé une classe d'équations paraboliques de diffusion fondée sur la notion de courbure moyenne (*MCM*). Leur équation de lissage sélectif, conduit à une diffusion principalement orientée dans la direction orthogonale au vecteur gradient. Une approche axiomatique formalisant les 4 principes d'une analyse multi-échelle a été proposée dans [Alv93]. Les espaces multi-échelle non-linéaires issus de cette axiomatique sont appelés *EMSS* (*Euclidian Morphological Scale Space*) et *AMSS* (*Affine Morphological Scale Space*). De manière indépendante, la même approche pour l'évolution affine des courbes de niveaux a été développée par Sapiro et Tannenbaum [Sap94]. Enfin, Weickert a étendu dans [Wei94] l'approche multi-échelle issue de l'EDP de diffusion anisotrope au cas des fonctions de diffusion tensorielle.

Au-delà de ces premières approches, la littérature sur les méthodes de diffusion utilisant le formalisme EDP est très abondante. La thèse de Romulus Terebes [T2] présente une étude bibliographique exhaustive. Cette étude comprend la présentation détaillée des principales méthodes ainsi que la description de leur implémentation numérique.

1.2 Lissage directionnel 1D et 1D/2D

Notre objet d'étude concerne le lissage des images texturées : ces images contiennent des structures qui possèdent une tendance directionnelle forte. De manière générale, ce type de problématique recouvre des domaines applicatifs variés (images de matériau, imagerie aérienne ou satellitaire, empreintes digitales, imagerie sismique, imagerie médicale, ...). Les premiers exemples qui serviront à illustrer le fonctionnement de nos méthodes sont des images représentant des gravures anciennes qui appartiennent également à cette classe des images texturées.

La figure 2 montre deux images au sein desquelles les structures peuvent être assimilées localement à des objets unidimensionnels.

Dans l'image de gauche, l'objectif est, en tout point, de lisser le signal uniquement dans la direction des objets selon un lissage directionnel que nous noterons "1D". La première approche de diffusion qui a été développée dans [T2] concerne ce cas particulier d'images totalement texturées dans lesquelles des "ruptures" d'orientation sont observées et pour lesquelles les méthodes de la littérature n'apportent pas de solution convaincante.

Dans le cas où l'image n'est pas une image complètement texturée mais contient à la fois des structures orientées et des zones sans orientation privilégiée, une démarche essentiellement 1D induira la création de structures filaires cohérentes de plus en plus perceptibles au cours du processus de diffusion. C'est pourquoi, nous avons développé en parallèle une version 1D/2D en autorisant une diffusion isotrope dans les zones non orientées.

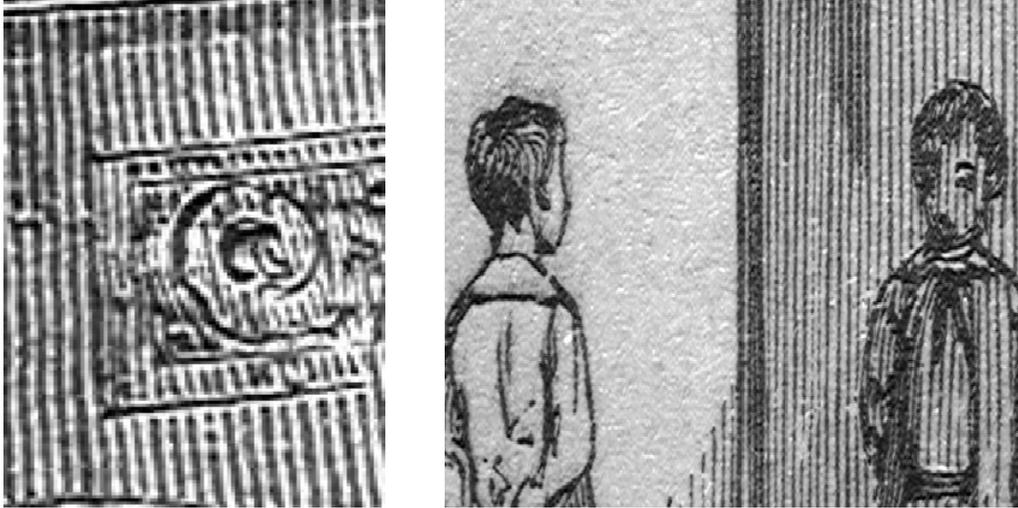


Fig.2- Image contenant des structures assimilables à des lignes.

1.2.1. Estimation de l'orientation locale

Développer une approche de diffusion directionnelle requiert la mesure de l'orientation en tout point de l'image.

Pour notre part, nous considérons les zones de l'image où l'action de l'opérateur de diffusion à une signification, c'est à dire les zones où les normes des vecteurs gradients sont non nulles. Le champ des vecteurs gradient est, par suite, représenté par un champ directionnel dont chaque élément quantifie l'intensité et la direction de la plus grande variation locale. En général l'orientation peut être assimilée à une direction et donc, estimée modulo π .

Pour définir l'orientation, nous supposons que l'image originale est continue ou continue par morceaux, la fonction luminance étant donc différentiable. L'orientation unique associée à (x,y) est définie par une variable circulaire modulo π :

$$\theta(x, y) = \left(\text{Arg}(\nabla U) + \frac{\pi}{2} \right) \bmod \pi = \left(\arctan \frac{U_y}{U_x} + \frac{\pi}{2} \right) \bmod \pi, \theta(x, y) \in [0, \pi) \quad (6)$$

Ainsi définie, l'orientation n'a de sens que si le vecteur gradient est non nul. Lors du processus de diffusion, la présence de gradients nuls correspond à des régions homogènes sur lesquelles le processus de diffusion doit être nul ou à tout le moins isotrope. Dans le cadre de nos travaux, l'estimation d'orientation fondée sur (6) conduit à associer une orientation quelconque aux zones de gradient nul. Pour une image non bruitée, l'orientation peut s'interpréter comme l'orientation d'une ligne d'isoniveau de gradient non nul passant par le pixel de coordonnées (x,y) .

L'estimation de l'orientation à partir des vecteurs gradients nécessite l'utilisation de masques numériques optimisés pour assurer l'invariance en rotations. Le problème principal est le *biais*

défini comme l'erreur systématique entre l'orientation estimée $\theta(x, y)$ et l'orientation réelle $\theta_r(x, y)$. L'étude du biais et la construction de masques numériques appropriés ont suscité récemment l'intérêt de plusieurs chercheurs [Dan90], [Far97]. Dans le cadre des EDP, le problème est traité dans [Luc97] pour les approches de diffusion de type mouvement selon la courbure moyenne euclidienne ou affine et dans [Sch00] pour la méthode de diffusion pour l'augmentation de la cohérence de Weickert.

Cette problématique est très largement abordée au sein du groupe Signal de l'IMS par Christian Germain. En particulier, un opérateur permettant de caractériser l'anisotropie des textures [A8] ainsi que des opérateurs dérivatifs optimisés pour l'estimation des orientations locales [Lep02] ont été développés. Le masque optimal est recherché dans le domaine spatial, en utilisant les développements en série de Taylor des fonctions représentant des surfaces orientées idéales. Ces derniers opérateurs se sont avérés significativement plus performants que les opérateurs classiques et nous ont conduits à retenir le masque développé dans [Lep05] qui présente un biais minimal :

$$M_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 0 & 6 & 0 \\ -1 & -16 & 0 & 16 & 1 \\ 0 & -6 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

L'utilisation des opérateurs de mesure d'orientation dans le cadre de la diffusion suppose bien entendu une estimation fondée sur des données bruitées. Même dans le cas de l'utilisation d'un estimateur non biaisé, l'erreur d'estimation s'accroît avec le niveau de bruit ; de plus, dans les zones où les normes des vecteurs gradients sont proches de 0, l'orientation est principalement définie par les valeurs du bruit (Fig.3).

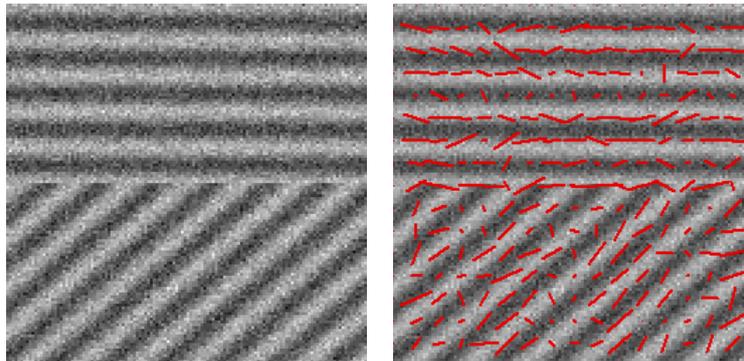


Fig.3- Orientations locales estimées sur une image affectée par un bruit blanc gaussien (SNR = 10 dB)

Un processus d'estimation robuste de l'orientation peut être obtenu en lissant l'image avant l'estimation des vecteurs gradients [Rao90], [Rao91]. L'orientation s'exprime dans ce cas par :

$$\theta(x, y) = \text{Arg}[\nabla(G_\sigma * U)] + \frac{\pi}{2} \bmod \pi = \left(\arctan \frac{U_{\sigma_y}}{U_{\sigma_x}} + \frac{\pi}{2} \right) \bmod \pi \quad (8)$$

Où G_σ est un noyau gaussien. Ce lissage isotrope présente plusieurs inconvénients : d'une part, si la taille du noyau (σ) est plus grande que la période, l'information directionnelle

fournie par les vecteurs gradients est dégradée. D'autre part, le lissage isotrope de l'image induit un déplacement des contours. La détermination de la taille du noyau relève d'ailleurs d'un choix difficile pour des applications pratiques : nous pouvons le considérer lié à la taille minimale des objets à conserver dans l'image [Rao91]. Signalons aussi que des techniques adaptatives peuvent être employées pour la détermination de σ [Gar96], [Lin93].

Indépendamment du lissage de l'image a priori, le lissage a posteriori de l'information directionnelle peut être envisagé. Les premiers résultats sur ce thème sont issus des travaux de Mardia [Mar72]. L'estimation de l'orientation pour des vecteurs gradients de norme non unitaire est issue de travaux classiques de Rao et Schunck [Rao91] et Kass et Witkin [Kas87]. Au sein de notre laboratoire, Marc Donias [Don99] a montré l'équivalence de l'ensemble de ces approches avec un lissage utilisant une Analyse en Composantes Principales sur le champ d'orientation, ce qui est équivalent à un calcul de tenseur de structure sur une certaine forme de support : les directions des vecteurs propres définissent les directions principales du champ vectoriel, l'orientation des structures correspondant à l'orientation du deuxième vecteur propre. Cette approche de lissage par moyenne tensorielle est équivalente à l'approche de Rao, équivalente à celle de Mardia pour des gradients normalisés et équivalente à la formulation de Kass et Witkin dans le cas de vecteurs non normalisés. D'autres approches sont apparues plus récemment dans la littérature en tant qu'extensions des méthodes de diffusion isotrope [Per98] et anisotrope [Tan00], [Sap00] pour les images en niveaux de gris. Pour des raisons liées au temps de calcul prohibitif de ces méthodes de diffusion d'orientation ainsi qu'à l'absence d'un critère d'arrêt objectif, le choix pour le calcul de l'orientation locale repose in fine sur l'opérateur gradient optimal lissé a posteriori à l'aide d'une moyenne tensorielle.

Le dernier point sur lequel doit porter la réflexion autour de la mesure de l'orientation est la taille du support de calcul du tenseur de structure (ou de l'ACP). Classiquement, pour des applications 2D, des formes rectangulaires ou circulaires peuvent être proposées. Des pondérations spatiales pénalisant l'éloignement au pixel central peuvent être introduites (e.g. lissage gaussien). A part l'avantage de l'invariance aux rotations, issu d'une pondération gaussienne, le choix du support (rectangulaire ou circulaire) nous paraît une question délicate, en liaison directe avec le niveau de bruit. Alors que le noyau gaussien favorise l'estimation pertinente de l'orientation pour des fenêtres centrées sur des pixels non bruités, le support rectangulaire, en utilisant le même poids pour tous les pixels, élimine de manière plus efficace l'influence des pixels bruités isolés.

Concernant la taille proprement dite, le calcul du tenseur confère à l'orientation estimée un caractère multi échelle à travers les dimensions de son support. L'orientation moyenne obtenue peut être vue comme une *tendance directionnelle* semi-locale de la texture. La taille du support est souvent mentionnée dans la littérature comme échelle d'intégration [Wei95], [Gar96], [Lin93] ; elle est liée à la taille d'un objet caractéristique présent dans l'image à analyser. Un autre aspect est la capacité d'élimination du bruit. Jahne [Jah97] de manière théorique et Donias [Don99] expérimentalement ont montré que la robustesse au bruit est étroitement liée à la taille du support.

Si l'intérêt de la moyenne tensorielle est sa capacité à fournir une orientation robuste pour des textures présentant une seule orientation dominante, son point faible réside dans l'introduction d'orientations erronées en présence de plusieurs orientations dominantes. Après une étude détaillée des principaux indicateurs utilisés pour la quantification de la pertinence de l'orientation estimée [Rao90],[Big91], [Don99], [Jah97] et leur utilisation dans des processus diffusifs [Wei95], [Gar96], [Wei97], [Wei98],[Sch00], nous avons proposé l'utilisation de la mesure de l'indice de confiance de Rao :

$$\hat{coh}[\hat{\theta}(x, y)] = \frac{\sum_{(i,j) \in W(x,y)} |\nabla U(x_i, y_j)| \cos^2[\hat{\theta}(x_i, y_j) - \hat{\theta}(x, y)]}{\sum_{(i,j) \in W(x,y)} |\nabla U(x_i, y_j)|} \quad (9)$$

où $\hat{\theta}(x_i, y_j)$ est l'orientation fournie par un tenseur de structure de support $W(x_i, y_j)$, et $\hat{\theta}(x, y)$ l'orientation associée au centre du support courant.

A partir de cet indicateur, nous avons introduit un algorithme permettant le calcul d'un tenseur de structure à support adaptatif en tout point de l'image. La taille du support est déterminée en maximisant l'indice de Rao.

La figure 4 illustre le fonctionnement de notre estimateur d'orientation. La taille du support varie d'une borne minimale de 3x3 pixels jusqu'à une limite supérieure fixée à 21x21 pixels. L'écart type du noyau gaussien de lissage a été fixé $\sigma = 0.8$.

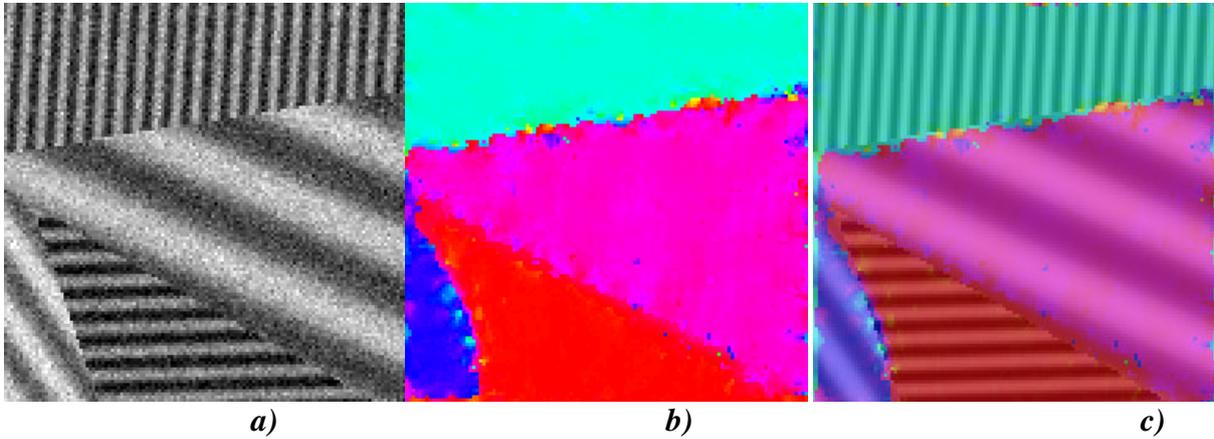


Fig. 4- Tenseur de structure à support adaptatif. a) Image originale bruitée. b) Orientation fournie par le calcul multi échelle (utilisation d'une palette demi circulaire associant une couleur à chaque orientation) c) Superposition des orientations sur l'image non bruitée.

1.2.2. Lissage directionnel 1D

Ce filtre est issu des travaux que nous avons présentés dans [C16], [C19] et, pour la version invariante aux rotations dans [C28]. Ils sont repris dans l'article [A5].

Modèle général

Le modèle général que nous proposons pour le lissage 1D est donné par [T4] :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = c_{\xi} U_{\xi\xi} \\ \vec{\xi} = \vec{i} \cos \theta + \vec{j} \sin \theta \\ c_{\xi} \in [-1, 1] \\ \theta(x, y) = \hat{\theta}, \forall (x, y) \in W(x, y) \end{cases} \quad (10)$$

Le vecteur de norme unitaire $\vec{\xi}$ indique la direction θ des structures locales ; celle ci est obtenue par la procédure décrite à la section précédente. La dernière hypothèse porte sur

l'invariance de l'orientation dans le voisinage $W(x,y)$; l'imposer revient à considérer le processus de diffusion sans prendre en compte les changements locaux du champ d'orientations (i.e. à l'intérieur du voisinage). Le comportement du processus est contrôlé essentiellement par l'orientation θ et par la conductivité c_ξ .

Alors que l'ensemble des méthodes EDP proposées dans la littérature utilisent comme conductivité une fonction de diffusion décroissante de la norme du gradient, nous proposons de contrôler la force du lissage par la valeur absolue de la dérivée directionnelle U_ξ calculée dans la direction de la structure : $c_\xi = f(|U_\xi|)$ où $f(\cdot)$ est une fonction décroissante.

Notre argumentation quant à l'utilisation de $|U_\xi|$ en lieu et place de $|\nabla U|$ repose sur sa capacité à fournir une indication de la pertinence de l'orientation estimée et sur sa moindre sensibilité au bruit. Ces propriétés sont démontrées dans [T2].

Fonction de diffusion

La fonction $f(\cdot)$ est directement inspirée des approches classiques sur les EDPs : nous avons proposé l'utilisation des fonctions de type Perona Malik dont les fonctions flux sont non monotones ou des fonctions de type Green [Gre90] ou Aubert [Cha94] caractérisées par des fonctions flux non décroissantes : les premières permettent un rehaussement adjoint au processus de lissage alors que les secondes se traduisent par un lissage en tout point.

Finalement, l'EDP proposée conduit, pour des valeurs faibles de U_ξ et indépendamment du choix de la fonction de diffusion, à un lissage directionnel le long des directions fournies par le tenseur de structure. Pour une fonction de type Perona Malik de seuil K_ξ , des valeurs $|U_\xi| > K_\xi$ conduisent à des coefficients de diffusion négatifs $c_\xi < 0$ et, par suite, à un rehaussement.

Version régularisée

Dans le cas d'images bruitées, l'influence combinée du biais et de la taille finie du support de calcul de l'orientation ne permet pas, en général, d'estimer l'orientation exacte de l'image originale, la dérivée directionnelle U_ξ dépendant à la fois des dérivées du signal et du bruit. Avec un filtre de lissage directionnel dont la fonction flux est non monotone, un processus de rehaussement parasite peut être introduit pour des valeurs fortes de U_ξ . Une régularisation de l'image originale est donc nécessaire ; nous avons proposé l'utilisation d'une démarche similaire à celle proposée par Catté et al. [Cat92] :

$U_{\sigma\xi} = \frac{\partial}{\partial\xi}(G_\sigma * U)$ est la dérivée directionnelle de l'image lissée par un noyau gaussien de taille σ . L'équation associée à la version régularisée est :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial\xi}[g(U_{\sigma\xi})U_\xi] \quad (11)$$

Résolution numérique

La mise en œuvre du processus de diffusion fondé sur un modèle continu implique des techniques d'approximation pour son implantation dans le domaine discret. Ces techniques constituent un domaine de recherche très vaste [Sib84]. Parmi les techniques d'approximation les approximations par différences finies sont utilisées de manière prépondérante.

Nous avons proposé deux types de schémas numériques pour l'implémentation du filtre de lissage directionnel 1D. En considérant des fonctions flux non monotones, la possibilité de produire un rehaussement réclame le contrôle de l'amplitude des oscillations induites en proposant des schémas numériques qui incluent un principe de maximum discret ; ces types de schéma sont implicitement stables.

Le premier schéma est issu de nos travaux présentés en [C16] et [C19] (4-voisinage) et [C53] (8 voisinage); il favorise les motifs orientés selon les directions principales mais n'est pas invariant aux rotations. C'est un schéma dit "d'interpolation des dérivées des fonctions flux". Dans le cas de la version non régularisée, l'objectif est d'approcher l'équation de diffusion en considérant un nombre infini d'orientations possibles sur une grille numérique. En identifiant chacune de ces orientations par un vecteur unitaire : $\vec{\xi}_k = \cos \theta_k \vec{i} + \sin \theta_k \vec{j}$, l'équation de diffusion peut être réécrite de manière directe par :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} [g(U_\xi)U_\xi] = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_k f_k(\theta_k) \frac{\partial}{\partial \xi_k} [g(U_{\xi_k})U_{\xi_k}] \quad (12)$$

où les fonctions $f_k(\theta)$ à valeurs dans $[0;1]$ présentent un maximum au voisinage de $\theta_k = \frac{\pi}{k} \bmod \pi$ et s'annulent pour des valeurs éloignées. Il est à noter qu'un tel choix de décomposition d'un opérateur différentiel selon un nombre préfixé de directions a également été proposé par Alvarez et al. [Alv92], pour l'implémentation de leur filtre de lissage sélectif.

Pour un nombre de directions fini, égal à M , l'égalité précédente n'est plus vérifiée.

L'équation de diffusion est approchée par une combinaison de dérivées des fonctions flux :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} [g(U_\xi)U_\xi] \approx \sum_{k=1}^M f_k(\theta_k) \frac{\partial}{\partial \xi_k} [g(U_{\xi_k})U_{\xi_k}] \\ \theta_k = k \frac{\pi}{M}, k \in \{0,1,\dots, M-1\} \end{array} \right. \quad (13)$$

Dans [C19] nous proposons l'utilisation de fonctions f_k de type sinusoidal en traitant le cas des 4 directions principales ($M=2$). Dans [T2], l'extension au cas $M=4$ est envisagé et conduit à un schéma pouvant s'exprimer sous la forme d'un noyau de convolution. La sélectivité du filtre est modulable en utilisant des puissances des fonctions d'interpolation.

L'expression du filtre numérique est obtenue en utilisant un schéma classique de diffusion anisotrope :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial \xi} g(U_\xi) U_\xi \cong \sum_{k=1}^M f_k(\theta) \frac{\partial}{\partial \xi_k} [g(U_{\xi_k}) U_{\xi_k}] \\
&\cong \sum_{k=1}^M f_k(\theta) \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left[g(U_{\xi_k}) \frac{U(\xi_k + d\xi_k/2, \eta) - U(\xi_k - d\xi_k/2, \eta)}{d\xi_k} \right] \\
&= \sum_{k=1}^M f_k(\theta) \left[g(U_{\xi_k}) \Big|_{\xi_k + d\xi_k/2} \frac{U(\xi_k + d\xi_k, \eta) - U(\xi_k, \eta)}{d\xi_k} - g(U_{\xi_k}) \Big|_{\xi_k - d\xi_k/2} \frac{U(\xi_k, \eta) - U(\xi_k - d\xi_k, \eta)}{d\xi_k} \right] \\
&\cong \sum_{k=1}^M f_k(\theta) \{ g[U(\xi_k + d\xi_k, \eta) - U(\xi_k, \eta)] D_{\xi_k}^+(U) - g[U(\xi_k, \eta) - U(\xi_k - d\xi_k, \eta)] D_{\xi_k}^-(U) \} = \\
&= \sum_{k=1}^M f_k(\theta) \{ g[D_{\xi_k}^+(U)] D_{\xi_k}^+(U) - g[D_{\xi_k}^-(U)] D_{\xi_k}^-(U) \}
\end{aligned} \tag{14}$$

$d\xi_k$ constitue un déplacement infinitésimal dans la direction de l'axe $\vec{\xi}_k$ et $D_{\xi_k}^+$ et $D_{\xi_k}^-$ sont les opérateurs d'approximation par différences finies.

La méthode de résolution proposée est explicite :

$$\begin{cases} U^{n+1} = U^n + dt \sum_{k=1}^M f_k(\theta) \{ g[D_{\xi_k}^+(U^n)] D_{\xi_k}^+(U^n) - g[D_{\xi_k}^-(U^n)] D_{\xi_k}^-(U^n) \} \\ U^0 = U_0 \end{cases} \tag{15}$$

Nous avons montré que le schéma numérique peut être mis sous la forme d'un noyau de convolution. De plus, nous avons introduit une condition de stabilité qui est assurée en fixant une borne minimum sur le poids du point central dans le masque de convolution. Ce schéma respecte ainsi le principe du maximum discret.

L'avantage essentiel de ce schéma est sa simplicité et sa rapidité ; il donne par ailleurs des résultats de très bonne qualité dès lors que les objets sont orientés verticalement horizontalement ou diagonalement.

Un second schéma optimisé permettant une invariance aux rotations a été proposé. Ce schéma repose sur une approximation directionnelle :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = g[D_\xi^+(U)] D_\xi^+(U) - g[D_\xi^-(U)] D_\xi^-(U) \tag{16}$$

avec:

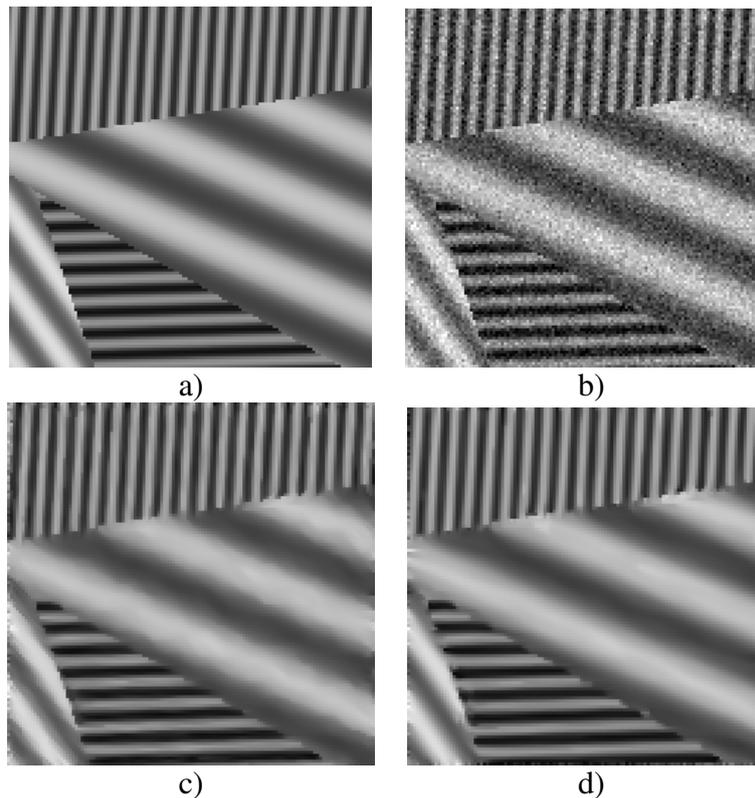
$$D_\xi^+(U) = \frac{U(\xi + d\xi, \eta) - U(\xi, \eta)}{d\xi}; D_\xi^-(U) = \frac{U(\xi, \eta) - U(\xi - d\xi, \eta)}{d\xi} \tag{17}$$

En estimant en tout point la tangente à la surface dont l'orientation est donnée par le tenseur de structure. Ce choix correspond à des développements limités en série de Taylor selon la direction de la tangente à la surface calculée localement. L'estimation des valeurs $U(\xi + d\xi, \eta)$ et $U(\xi - d\xi, \eta)$ nécessite une précision sub-pixel. Nous avons proposé l'utilisation d'une approche fondée sur des interpolations polynomiales d'ordre 3 ; nous avons montré que l'utilisation des ordres supérieurs augmente le temps de calcul, sans produire un gain significatif en précision [C28].

Nous proposons ici encore un schéma de résolution explicite ; cependant l'absence de relation d'ordre entre les valeurs interpolées et les valeurs des pixels placés sur la grille

rectangulaire conduit à rejeter le principe de maximum. Nous avons donc proposé de contraindre le processus en bornant chaque valeur interpolée.

La figure 5 illustre le comportement des deux schémas numériques. Pour les textures verticales et horizontales, les résultats sont très proches. Toutefois, le gain du deuxième schéma numérique (voisin de 1dB) est essentiellement lié à la meilleure reconstruction de la zone centrale des images, contenant une texture orientée à -22 degrés. Ce cas est critique pour le premier schéma qui produit une légère irrégularité. En contrepartie, le temps de calcul associé au premier schéma est trois fois plus faible.



*Fig. 5- Comparaison des deux schémas numériques. a) Image originale. b) Image bruitée (SNR=10dB)
c) Schéma par interpolation des dérivées d) Schéma par interpolation des niveaux de gris*

1.2.3. Lissage directionnel 1D/2D

La figure 6 illustre le comportement de la méthode de diffusion directionnelle 1D dans le cas d'une image qui n'est pas exclusivement une image texturée. La méthode proposée restaure de manière efficace les structures allongées ; elle a, par contre, tendance à créer des structures filaires cohérentes nettement perceptibles dans la zone de niveau de gris constant.

Nous avons proposé une généralisation de la méthode 1D en introduisant une seconde dimension de diffusion (le long de la direction du premier vecteur propre du tenseur de structure) dans le cas où la mesure de l'orientation locale met en évidence l'isotropie des structures.

L'équation de diffusion proposée est [C28] :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = c_{\xi} U_{\xi\xi} + c_{\eta} U_{\eta\eta} \quad (18)$$

avec :

$$\begin{cases} c_\xi = \frac{\partial}{\partial \xi} [g^\xi(U_\xi)U_\xi] \\ c_\eta = \frac{\partial}{\partial \eta} [g^\eta(U_\eta)U_\eta] \end{cases} \quad (19)$$

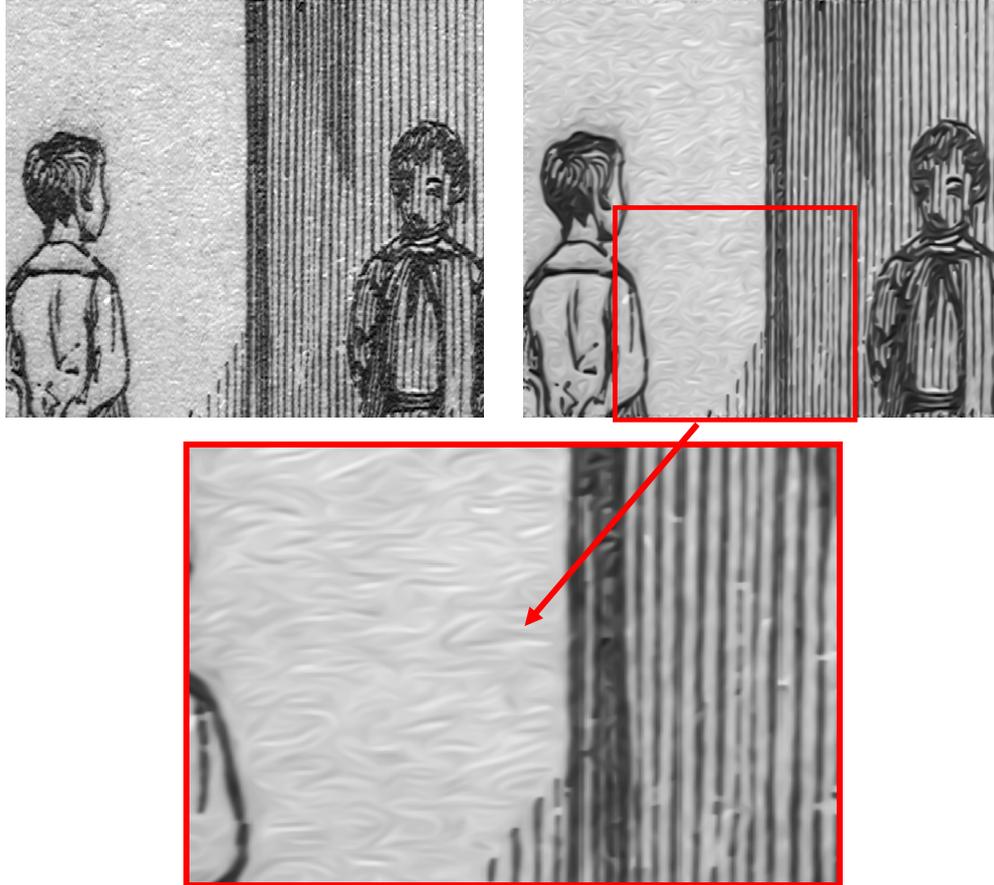


Fig.6- Image originale et résultat du filtre de lissage 1D. Paramètres : $\sigma=0.75$, $t=240$.

La dérivée directionnelle U_η s'écrit $U_\eta = \nabla U \cdot \vec{\eta}$ avec $\vec{\eta} = -\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{j}$ orienté selon la direction du premier vecteur propre. Les fonctions de diffusion peuvent être choisies de manière à induire un comportement anisotrope particulier. Pour notre part, nous proposons d'utiliser deux fonctions rationnelles de Perona-Malik :

$$\begin{cases} g^\xi(s) = \frac{1}{1 + (s/K_\xi)^2} \\ g^\eta(s) = \frac{1}{1 + (s/K_\eta)^2} \end{cases} \quad (20)$$

Le comportement de la diffusion est paramétré par le rapport des deux constantes de diffusion $\alpha = K_\eta / K_\xi$ à valeur dans l'intervalle $[0,1]$. Une valeur de α proche de 1 favorise un

comportement identique (mais non isotrope) de la diffusion. Une valeur faible (proche de 0) permet de faire tendre le comportement de la diffusion vers un modèle de lissage 1D.

L'implémentation numérique que nous proposons pour cette approche est une implémentation fondée sur l'interpolation des niveaux de gris effectuée dans chacune des 2 directions principales η et ξ .

La figure 7 illustre l'intérêt de l'approche 1D/2D dans le cas d'une image mixte présentant des zones homogènes.



Fig.7- résultat des filtres de lissage 1D (gauche) et 1D/2D (droite). Paramètres : $\sigma=0.5$, $t=16$, $\alpha=0.5$.

1.3 Diffusion Flux-Cohérence

Les approches de diffusion proposées au paragraphe précédent sont sensibles aux variations du signal dans les directions des structures. En particulier, toute discontinuité dans une structure linéaire est susceptible d'être rehaussée.

Lorsque l'objectif est l'amélioration de l'image, les structures doivent parfois être prolongées, les discontinuités comblées. La classe de méthodes qui semble le mieux à même de répondre à cet objectif est la classe des méthodes tensorielles.

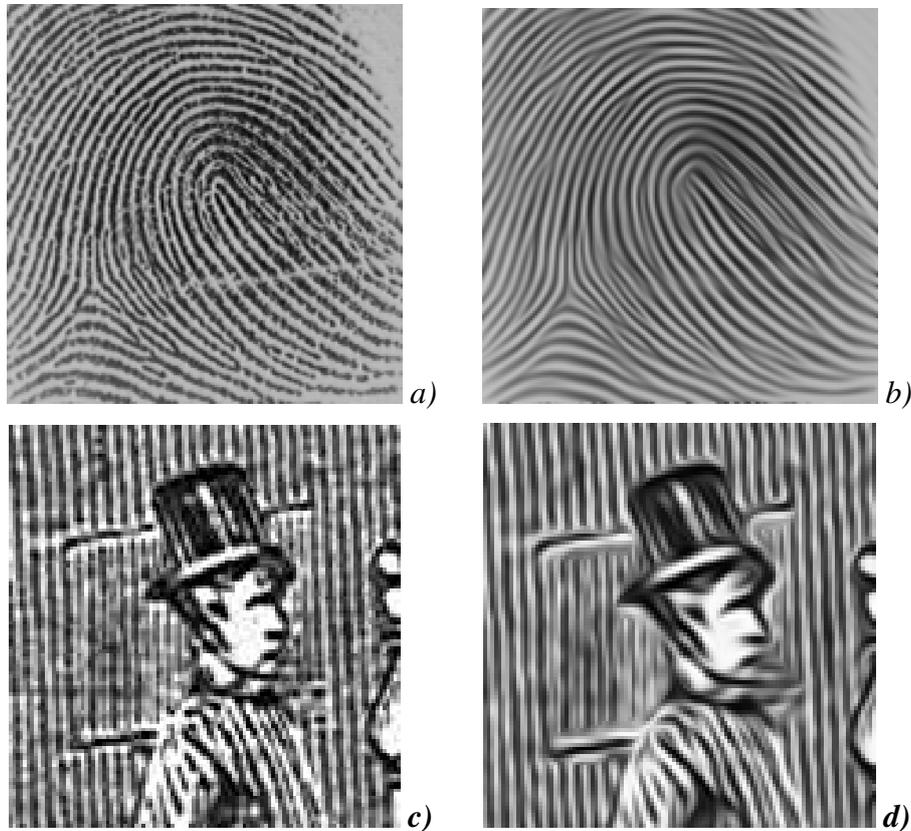
Nous avons donc proposé un modèle de diffusion directionnelle qui est une version modifiée de la *Coherence Enhancement Diffusion* de Weickert [wei99]. La CED est un outil puissant dédié à la restauration des structures filaires. Cependant cette méthode fonctionne uniquement lorsque les variations d'orientation ne sont pas brusques : de fait, les résultats généralement présentés concernent le rehaussement d'empreintes digitales pour lesquelles aucune rupture franche d'orientation n'est présente (Fig 8 a et b) ; a contrario de fausses continuités apparaissent au niveau des terminaisons des structures dans une image présentant des ruptures d'orientation nombreuses (Fig 8 c et d).

L'objectif par rapport à cette méthode référence a donc été de construire une approche mieux adaptée au lissage des images présentant des structures filaires et caractérisées par des variations fortes d'orientations [A10].

L'équation de diffusion proposée est inchangée par rapport à l'équation proposée par Weickert [C20] :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \text{div}[D(J_\rho(\nabla U)_\sigma)\nabla U] \quad (21)$$

où la matrice de diffusion D est construite à partir du tenseur de structure calculé localement. D possède les mêmes vecteurs propres que le tenseur de structure et des valeurs propres choisies pour gérer le comportement de la diffusion. C'est sur ce choix des valeurs propres que nous avons proposé une démarche originale.



*Fig.8- Résultat d'une diffusion CED sur deux types d'image.
a) et c) images originales b)et d) images diffusées.*

Dans le cas de la CED, la fonction de diffusion le long de la direction du second vecteur propre paramétrée par la cohérence de Kass et Witkin :

$$\lambda_1 =: \alpha$$

$$\lambda_2 =: \begin{cases} \alpha & \text{si } j_{11} = j_{22} \text{ et } j_{12} = 0 \\ \alpha + (1 - \alpha) \exp\left[-\frac{C}{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2}\right] \sin\theta & \text{sinon} \end{cases} \quad (22)$$

En comparaison avec les autres mesures de confiance, fondées sur les valeurs propres du tenseur de structure, cette mesure présente l'avantage de ne pas dépendre du niveau du bruit présent dans l'image. Néanmoins, la force de diffusion dépend du contraste local, la différence $\mu = \lambda_1 - \lambda_2$ n'étant que la variation du contraste moyen mesuré dans les directions de la cohérence maximale et minimale. Pour des images contenant des structures de périodes variables, cela se traduit par un lissage préférentiel des zones à fort contraste. Un autre effet connu de la CED est "l'arrondissement" des coins, conséquence de l'utilisation d'une mesure de confiance qui ne s'annule que très rarement.

Ces limitations nous ont conduit à proposer une approche fondée sur la cohérence de Rao notée $coh(\theta)$.

Cet indicateur possède un certain nombre de propriétés attractives comme l'indépendance au niveau de bruit et sa capacité à marquer très nettement les ruptures d'orientations :

$$\lambda_1 =: \alpha$$

$$\lambda_2 =: \begin{cases} \alpha & \text{si } j_{11} = j_{22} \text{ et } j_{12} = 0 \\ \alpha + (1 - \alpha)h_\tau[\text{coh}(\theta)] & \text{si } j_{11} \text{ ou } j_{22} \text{ ou } j_{12} \neq 0 \end{cases} \quad (23)$$

La fonction seuil h_τ proche de celle proposée par Monteil et Beghdadi [Mon99] est une fonction sigmoïde qui permet de paramétrer la discrimination entre zone cohérente et non cohérente [C17] et [C20].

L'utilisation de la cohérence au sens de Rao nous conduit à un modèle pour lequel la force de diffusion est fortement réduite dans les zones de faible confiance qui correspondent clairement aux ruptures d'orientation. Néanmoins, ce choix des valeurs propres ne modifie pas les propriétés citées par Weickert [Wei99] : le tenseur de diffusion dépend de manière continue de l'image analysée, il est symétrique et défini positif. Dans ces conditions, l'unicité de la solution est garantie tout en respectant le principe de maximum discret. La continuité du tenseur de diffusion est assurée seulement pour des supports gaussiens. Par rapport à la CED, la méthode que nous proposons est, de plus, invariante aux changements de contraste de l'image originale.

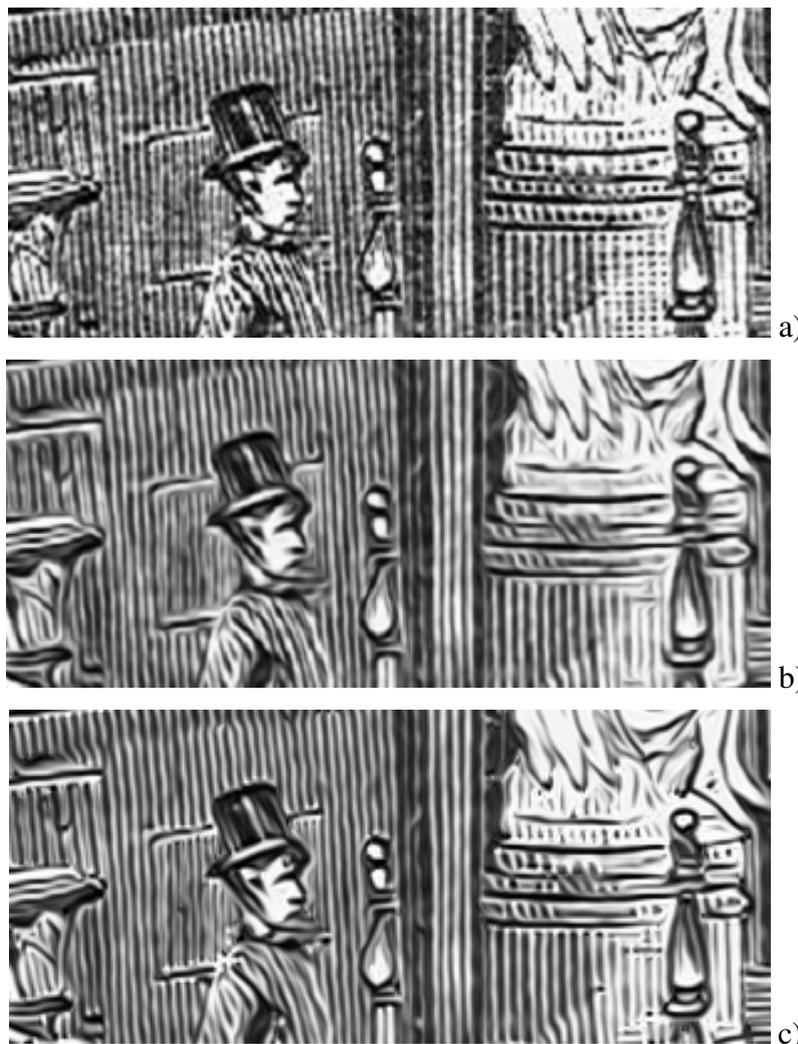


Fig.9- (a) Image originale
Résultats comparés de la diffusion CED (b) et de la diffusion flux-cohérence (c)

La figure 9 illustre les résultats comparés entre les deux approches tensorielles. Malgré la proximité apparente des images obtenues, nous pouvons noter l'intérêt de notre approche Flux-Cohérence tensorielle par comparaison au résultat de la CED dans les zones de rupture d'orientation. En ce qui concerne la *CED*, des modifications très visibles du contenu structurel de l'image sont introduites. Les jonctions sont arrondies, les zones en pointillés deviennent des lignes ; ce sont typiquement des effets visibles dans tous les travaux de Weickert. La méthode Flux-cohérence tend à limiter ces inconvénients sans toutefois s'en affranchir complètement.

1.4 Validation et applications des approches de diffusion directionnelle

La démonstration de l'efficacité de nos approches a été réalisée à travers un important travail expérimental présenté dans [T2]. Cette étude a nécessité une analyse complète des méthodes les plus classiques présentées dans la littérature pour en proposer une implémentation la plus fidèle et efficace possible. L'étude a concerné neuf méthodes de diffusion scalaire et tensorielle jugées représentatives de chaque classe d'approche, auxquelles s'ajoutent nos cinq méthodes de diffusion directionnelle : diffusion 1D avec 2 schémas numériques différents, diffusion 1D/2D, Diffusion Flux-cohérence ainsi qu'une version linéaire de la diffusion Flux-cohérence pour laquelle la diffusion locale ne dépend que de l'image originale [A10])

Le protocole expérimental a été défini en considérant le type d'images sur lesquelles nos méthodes doivent présenter un apport significatif : une base de 15 images de synthèse contenant des textures orientées selon diverses fréquences, amplitudes et orientations est construite. Ces images sont générées sur la base d'une partition de l'image en pavage de Voronoi ; des profils sinusoïdaux théoriques de fréquence, d'orientation et d'amplitude différentes sont ensuite définis dans chaque pavé. La partition par pavage de Voronoi permet notamment l'étude du comportement de chaque méthode autour des limites des polygones caractérisées par des variations fortes d'orientation. Chaque image a été bruitée à l'aide d'un bruit blanc gaussien pour obtenir de niveau de bruit correspondant à des *SNR de l'ordre de 5 dB et 10dB* (Fig 10). La comparaison des méthodes est fondée sur les mesures de PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) [Avc02] et de SNR [Kor96], [Kor99]. Notons que pour chaque méthode, le jeu de paramètres optimal au sens des deux critères a été recherché puis utilisé.

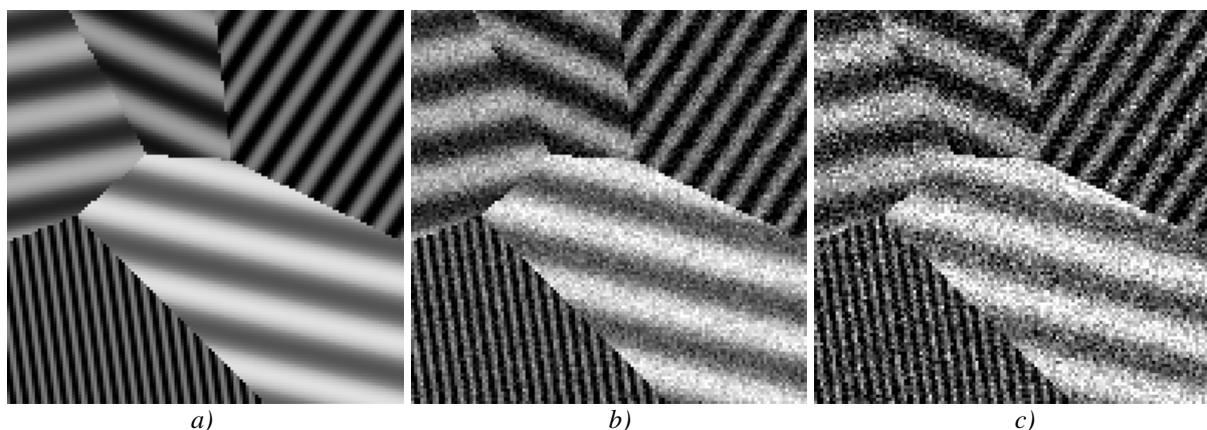


Fig.10 -Image test a) Image originale. b) Image bruitée SNR=10dB). c) Image bruitée SNR=5dB

Les conclusions de l'étude ont révélé tout l'intérêt de nos approches pour le filtrage des images texturées. La qualité visuelle des résultats obtenus est perceptible (Fig 12). Parallèlement, l'ensemble de nos cinq approches a conduit à des résultats significativement améliorés pour les critères de PSNR et SNR et pour les deux niveaux de bruit. La figure 11 illustre les résultats pour le critère SNR avec le niveau de bruit élevé. La composition des groupes homogènes (au sens du test de Student-Newman-Keuls) démontre la supériorité de l'approche 1D/2D. Quel que soit le schéma numérique utilisé (interpolation des dérivées des fonctions flux -1D_{id} - ou interpolation des niveaux de gris - 1D_{in}), la diffusion 1D donne des résultats supérieurs aux méthodes scalaires auxquelles il convient de la comparer. De la même manière, la méthode tensorielle que nous avons proposée surclasse de manière significative et dans ces deux versions (FC, FCL) les méthodes tensorielles de références (EED et CED).

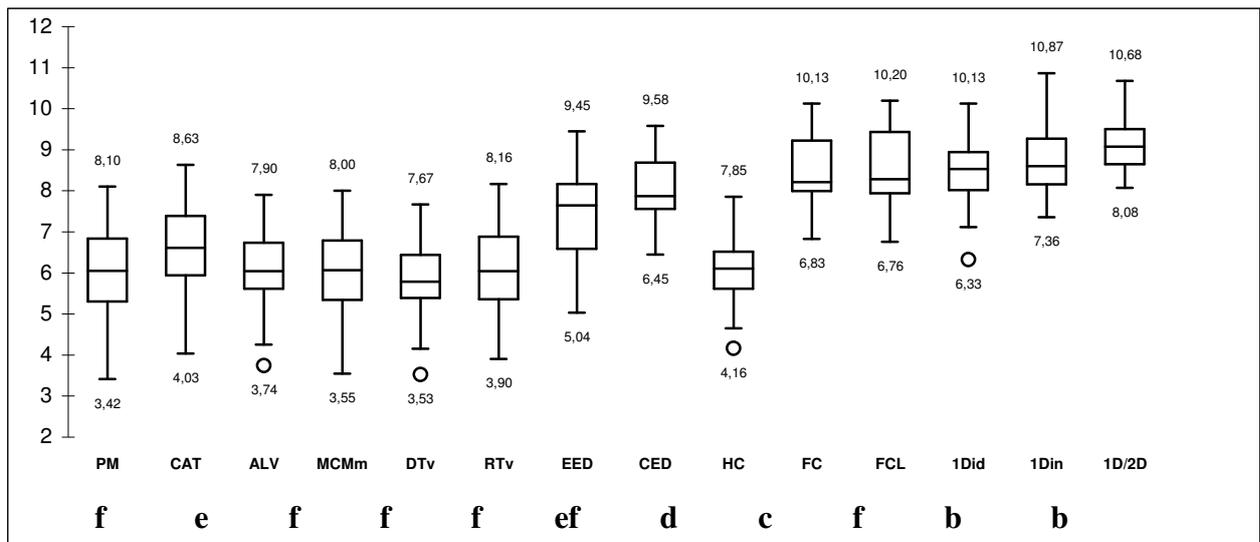


Fig 11 Distribution des gains en SNR pour l'ensemble des méthodes testées - bruit fort.

Les méthodes de diffusion que nous avons introduites ont fait l'objet d'applications dans divers domaines.

La première application a motivé les travaux développés dans [T2] et publiés dans [A5] et [A10]. Il s'agit de l'amélioration et de la restauration d'images représentant des gravures ou des manuscrits anciens numérisés. Cette problématique a été soulevée à travers une collaboration avec la société I2S basée à Pessac dont une des activités consiste à proposer des solutions de numérisation de documents. Dans le cas présent l'objectif est la numérisation et la restauration de documents anciens à des fins d'archivage.

Les deux types d'images (gravures et manuscrits) sont de nature différente : les gravures sont constituées de traits fins et parallèles et sont caractérisées par des contrastes variables, des fréquences spatiales différentes et par la présence de nombreuses jonctions entre structures d'orientation différente. C'est en travaillant sur ce type d'image que nous avons développé les approches de diffusion 1D mais également les approches tensorielles (Diffusion Flux-Cohérence). Les manuscrits ont un contenu informationnel moins riche et sont composés essentiellement de traits et structures fines au sein de régions non texturées. Le filtrage et le rehaussement de telles images a conduit au développement de l'approche 1D/2D.

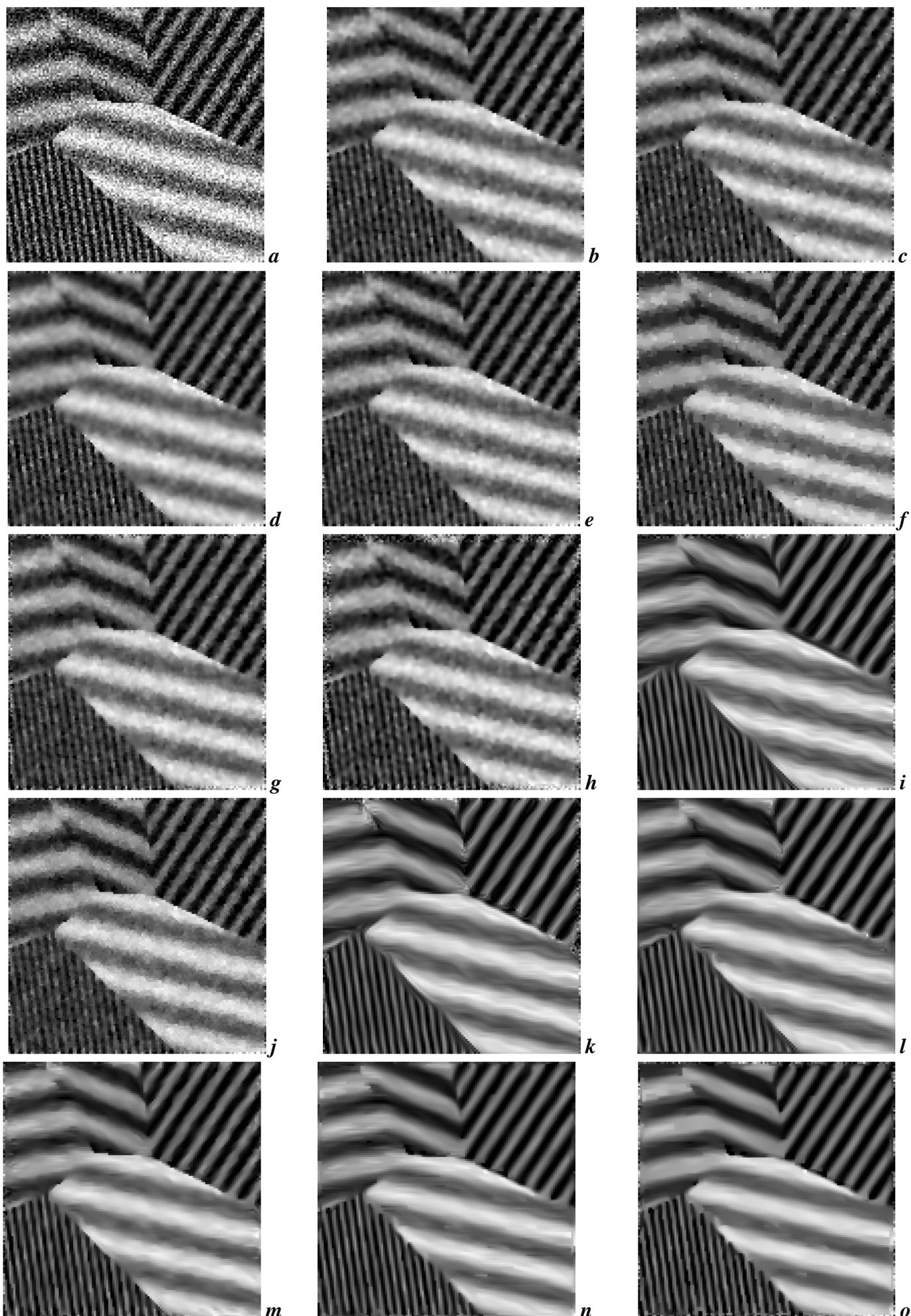


Fig 12 Résultats produits par les approches EDP. a) image originale bruitée, b) Perona-Malik [Per90], c) Catté et al [Cat92], d) Alvarez et al [Alv92], e) MCM de Yezzi [Yez98], f) DTv [Rud92], g) RTv [Cha00] h) EED [Wei94] i) CED [Wei99] j) HC [Kor99] ; nos méthodes : k) FC l) FCL. m) IDid. n) IDin. o) ID/2D

La figure 13 représente une gravure numérisée. La faible qualité du document original et les artefacts inhérents à la numérisation conduisent à une image relativement bruitée. L'orientation locale obtenue par l'utilisation d'un tenseur de structure multi-échelle est représentée à la figure 14 La figure 15 illustre les résultats obtenus par nos méthodes de diffusion : la figure 15a montre le filtrage obtenu par l'utilisation de l'approche 1D avec l'interpolation sur les niveaux de gris. Notons que l'image restaurée est très proche topologiquement de l'image bruitée, les détails de l'image originale étant conservés. L'approche tensorielle *Flux Cohérence* montre une meilleure capacité à lisser et à rehausser les régions présentant des structures linéaires. En contrepartie, notons la mauvaise reconstruction des pointillés : de fait, la méthode, comme l'ensemble des approches tensorielles a tendance à reconstruire des lignes dans ces régions. Ces approches, dédiées à des tâches d'amélioration d'image, accentuent notablement les structures linéaires.



Fig.13- Gravure numérisée. Image originale.

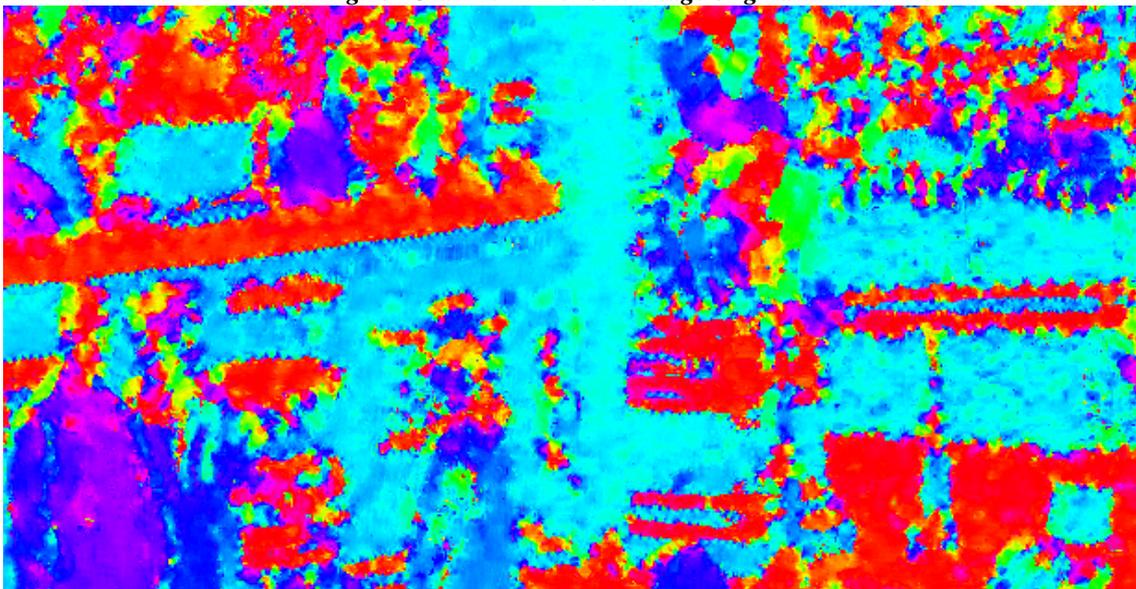


Fig.14 Orientation - tenseur de structure multi échelle

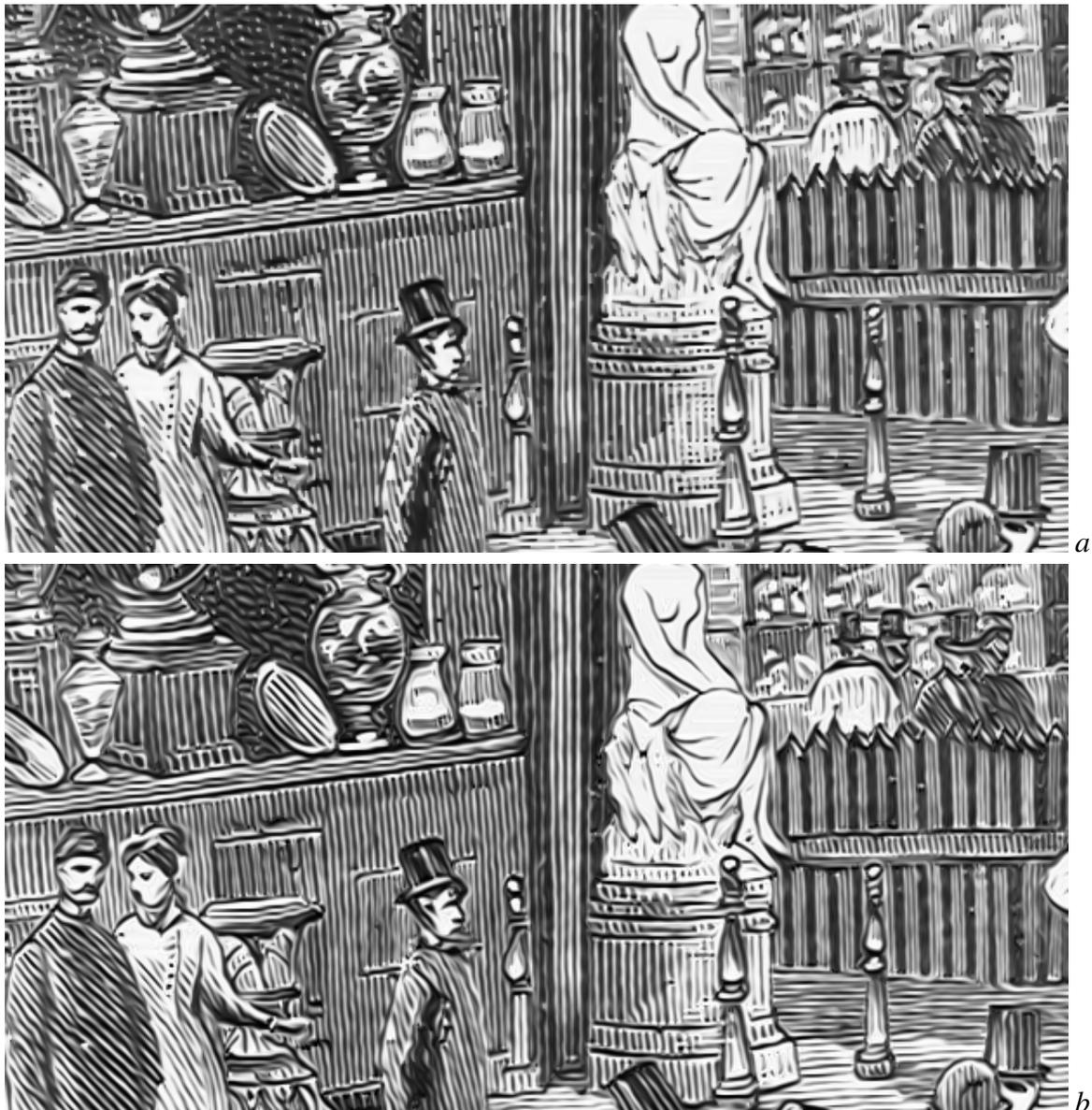


Fig.15 a) Résultats 1Din b) Résultats Flux Cohérence

Pour conclure sur le domaine applicatif des gravures ou documents numérisés, les figures 16 et 17 illustrent l'intérêt de l'approche 1D/2D qui est la seule permettant de traiter des images non totalement texturées. Cette approche est sans conteste celle qui conduit aux résultats les plus satisfaisants pour une famille très large d'images. Notons de plus que c'est une méthode relativement peu sensible au paramétrage ; sa mise en œuvre s'en trouve donc facilitée.

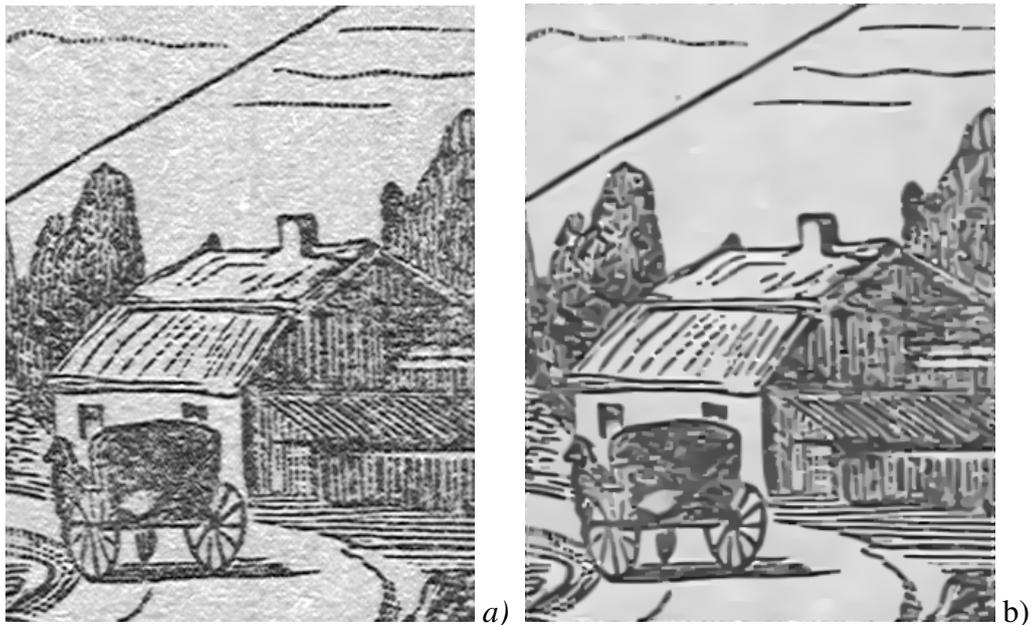


Fig.16 - a) Image originale. b) Résultat 1D/2D $n=125$, $\sigma=0.5$, $\alpha=0.5$.

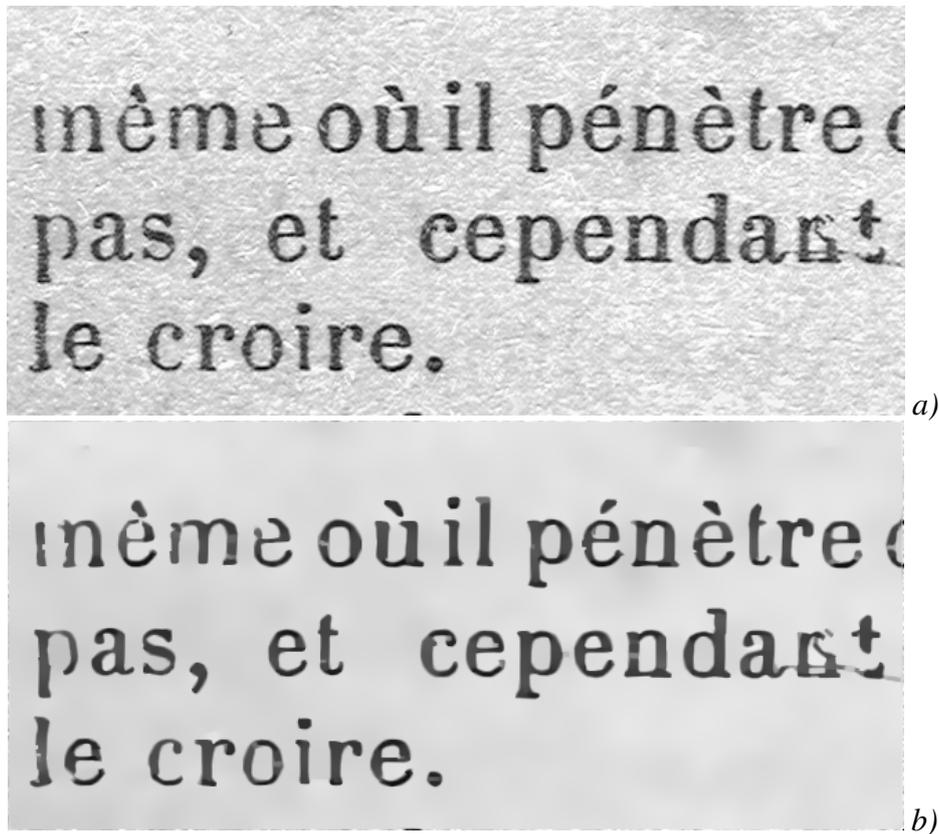


Fig.17- Filtrage d'un texte numérisé. a) Image originale. b) Résultat 1D/2D.

D'autres domaines applicatifs ont confirmé l'intérêt de nos méthodes.

L'imagerie permettant la caractérisation des matériaux composites est au cœur de l'activité d'une partie de l'équipe dans le cadre d'une collaboration avec le groupe Safran (le groupe Signal de l'IMS est pôle externe de recherche du groupe Safran). La caractérisation des matériaux s'appuie sur des images ou des volumes dont le processus d'acquisition est entaché de bruit. La figure 18, représente une coupe 2D d'une tomographie effectuée sur un composite carbone/carbone fibreux. L'objectif d'un pré-filtrage est de s'affranchir du bruit

tomographique structuré, circulaire nettement visible sur l'image originale. L'image de droite montre le résultat après diffusion par la méthode 1D/2D.

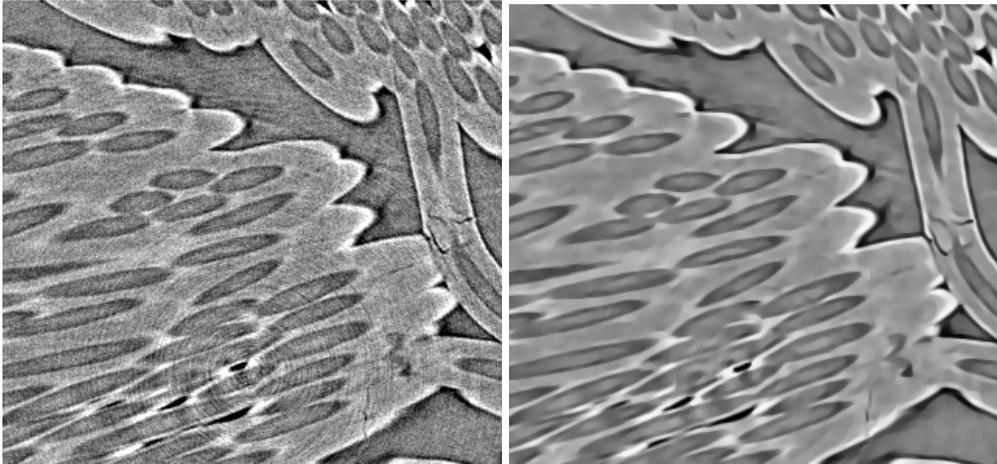


Fig.18- Tomographie d'un matériau fibreux (coupe 2D – détail). Résultat de la diffusion 1D/2D.

Un autre domaine d'application concerne la télédétection à très haute résolution pour la viticulture de précision. Dans le cadre du projet européen PIMHAI, nous développons des travaux sur la segmentation parcellaire et la caractérisation de la variabilité intra parcellaire [A12]. Dans le cadre du Workpackage 1 dédié au pré traitement et au filtrage d'images de télédétection, l'utilisation des méthodes 1D/2D et flux cohérence a été proposée [C62]. La figure 19 illustre les résultats obtenus sur une vue aérienne de parcelle de vigne.

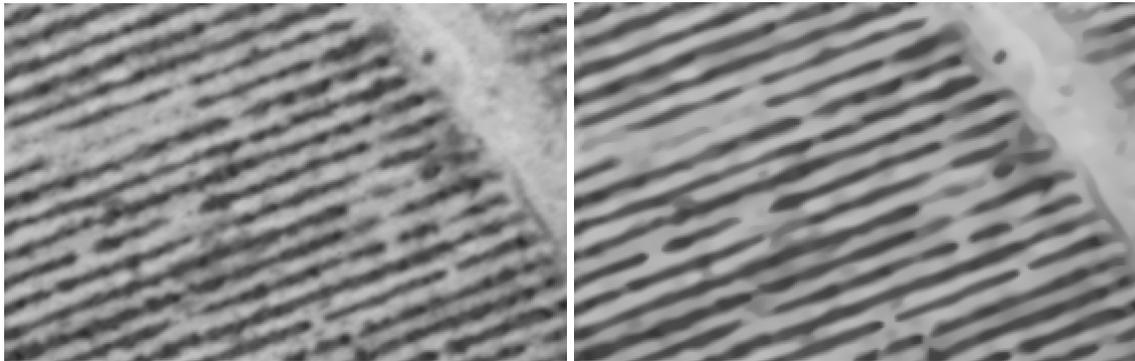


Fig.19- Image de télédétection sur vigne. Résultat de la diffusion 1D/2D.

Enfin, le dernier domaine d'application que je citerai est le plus important dans le cadre de mes activités : il s'agit de l'imagerie sismique. Ce domaine recouvre les activités menées avec un certain nombre de mes collègues au sein du LASIS, laboratoire commun avec le groupe Total. Pour répondre au besoin de l'amélioration et du rehaussement des blocs issus d'une acquisition par sismique réflexion, nous avons à la fois réalisé l'extension 3D des approches présentées dans ce chapitre et développé des approches dédiées qui feront l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2 : Diffusion directionnelle 3D pour la sismique

2.1 Problématique du filtrage en imagerie sismique

Dans le cadre des activités du LASIS, le filtrage des données 3D issues de la sismique réflexion est l'une des problématiques récurrentes.

La sismique réflexion qui consiste à étudier les réflexions d'ondes élastiques se propageant à travers les différentes couches du sous-sol donne naissance, après juxtaposition des traces sismiques, à un bloc tridimensionnel composé de strates empilées appelées horizons ou marqueurs (Fig. 20).

L'interprétation des images sismiques nécessite alors l'expertise d'un géologue pour identifier les *roches mères*, où se sont formés les hydrocarbures, analyser les migrations potentielles de ces hydrocarbures, et déterminer les réservoirs résultants d'une possible accumulation. Dans le cadre de cette analyse, l'étude des discontinuités et fractures éventuelles des horizons est essentielle.

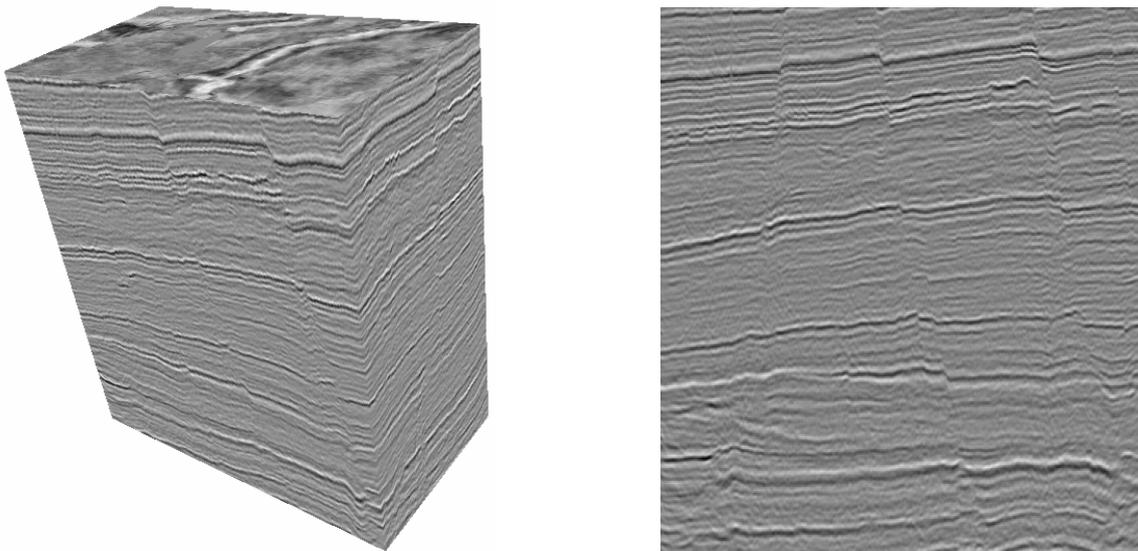


Fig.20 – Bloc sismique 3D – Le même bloc vu de face (In Line)

L'objectif d'un filtrage de ces données est de faciliter la tâche du géologue en diminuant les bruits d'acquisition. L'opération de filtrage ne doit en aucun cas altérer les structures présentes dans la donnée. Les méthodes que nous avons développées ont donc pour but le rehaussement de l'information contenue dans le bloc tout en assurant la préservation des événements sismiques (discontinuités, fractures, ...).

Le travail du géologue structuraliste consiste notamment à localiser les failles pour aboutir à une interprétation complète de la structure des réservoirs. Cette segmentation supervisée réalisée à l'aide d'une interface adaptée est cependant une tâche fastidieuse qui exige un temps d'exécution très important. De plus, on peut noter le caractère subjectif de l'interprétation humaine.

Des méthodes de détection/localisation automatique de failles ont été développées pour apporter une réponse aux inconvénients que nous venons de citer [Ger99][Ran00]. En particulier, dans le cadre des activités du LASIS, et sous l'impulsion de Yannick Berthoumieu et Marc Donias, des opérateurs linéiques fondés sur un principe d'inhibition ou de renforcement par accumulation ont été développés [A15]. Parallèlement à ces développements, je coordonne des travaux sur une approche stochastique de segmentation de failles par processus de points marqués à travers la thèse de Barna Keresztes [T5].

Replacé dans le contexte de la segmentation automatique, l'objectif du filtrage du bloc sismique est relativement clair : le filtrage et le rehaussement de la donnée doit conduire à une détection améliorée des failles en réduisant de manière significative les fausses alarmes et en améliorant la continuité des détections.

Dans la littérature géophysique consacrée au filtrage des données de réflexion, la plupart des méthodes relèvent du filtrage adaptatif 2D : l'objectif est la prise en compte de la connaissance a priori des données pour adapter le support de filtrage. Certaines méthodes modifient la forme, la taille, ou même la position du support à partir d'informations extraites de la région de l'image considérée. L'Orientation Adaptive Gaussian Filter proposé par Bakker et al [Bak99] consiste à adapter la forme d'un masque gaussien bidimensionnel orienté selon les horizons. O'Malley et al [Oma04] proposent d'adapter l'élongation du filtre à l'anisotropie locale. Le Gaussian Laplacian Like Enhancement [Gui98] repose sur une approche voisine mais qui minimise le poids des pixels dont le niveau de gris s'éloigne de celui du pixel courant. Enfin, [Bak02] propose le Generalized Kuwahara Filter [Bak02] qui permet un décalage du support de filtrage pour prévenir le lissage à travers les discontinuités.

D'autres méthodes de filtrage dédiées à la sismique ont été proposées. La *Non-separable 2D Complex Lapped Transform* est une approche fondée sur l'emploi d'un banc de filtres [Gau05]. Enfin, citons les travaux menés au sein du LASIS par Brahim Aksasse et Yannick Berthoumieu qui, en assimilant les données de réflexion à un mélange de structures orientées complétées d'une composante purement aléatoire, abordent le filtrage comme un problème de modélisation paramétrique et proposent un filtre fréquentiel approprié [Aks06].

Au travers des travaux de thèse de Régis Dargent [T3] et de Sorin Pop [T4], nous avons abordé le problème du filtrage des données sismiques en considérant la donnée sismique comme un empilement de couches quasi parallèles dont la continuité est perturbée par la présence de failles (Fig 21). Nous proposons alors d'opérer un processus de diffusion le long des horizons tout en cherchant à stopper ce processus au niveau des plans de failles.

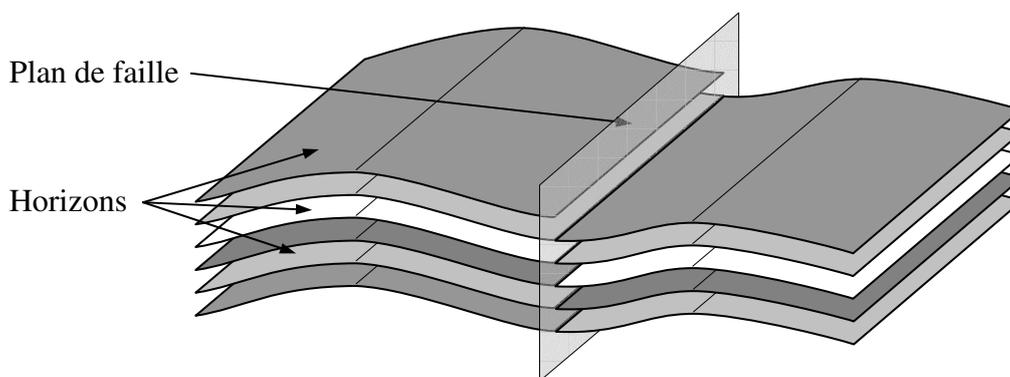


Fig.21- Modélisation d'un bloc de données sismiques

Dans le prolongement des travaux présentés au chapitre précédent, nous avons proposé une extension directe de la méthode de diffusion directionnelle 1D que nous avons baptisée "diffusion tangentielle" [C26]. Le principe est cette fois d'opérer la diffusion le long du plan tangent à la structure locale défini par les 2^{ème} et 3^{ème} vecteurs propres d'un tenseur de structure multi-échelle.

La direction des deux vecteurs propres étant quelconque, le schéma numérique que nous proposons d'utiliser prend en compte des déplacements élémentaires $d\xi$ en considérant des couples de points situés le long d'un cercle C de rayon $d\xi$ autour du pixel courant (Fig. 22).

Comme les diffusions directionnelles 1D ou 1D/2D, la méthode requiert une précision sub-pixel : Les différences finies sont calculées sur des points n'appartenant pas à la grille initiale et dont les intensités sont obtenues en utilisant une interpolation quadratique 2D.

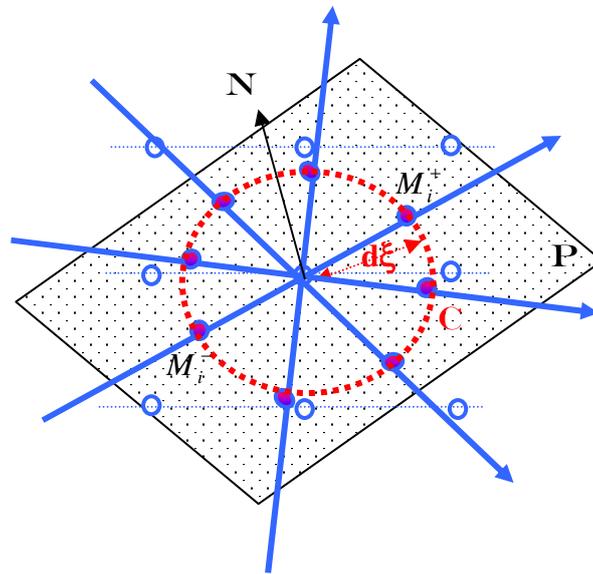


Fig.22 - Interpolations sur le plan tangent

L'approche proposée est donc une extension de la méthode 1D avec interpolation en niveau de gris :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_i [g[D_i^+(U)]D_i^+(U) + g[D_i^-(U)]D_i^-(U)] \quad (24)$$

où

$$D_i^+(U) = \frac{U(M_i^+) - U(\xi)}{d\xi}; D_i^-(U) = \frac{U(M_i^-) - U(\xi)}{d\xi}$$

La figure 23 illustre l'efficacité de cette approche sur un bloc de synthèse. Outre l'aspect visuel sur le bloc lui même, l'utilisation d'un détecteur de faille (ici, un attribut fondé sur le niveau de cohérence de l'orientation) nous permet de mieux appréhender le niveau d'efficacité des méthodes de filtrage.

Au-delà de la qualité des résultats, cette approche se heurte au problème de la taille des données à traiter. Le coût calculatoire lié aux interpolations est une contrainte pénalisante qui nous a conduits à proposer des alternatives moins coûteuses.

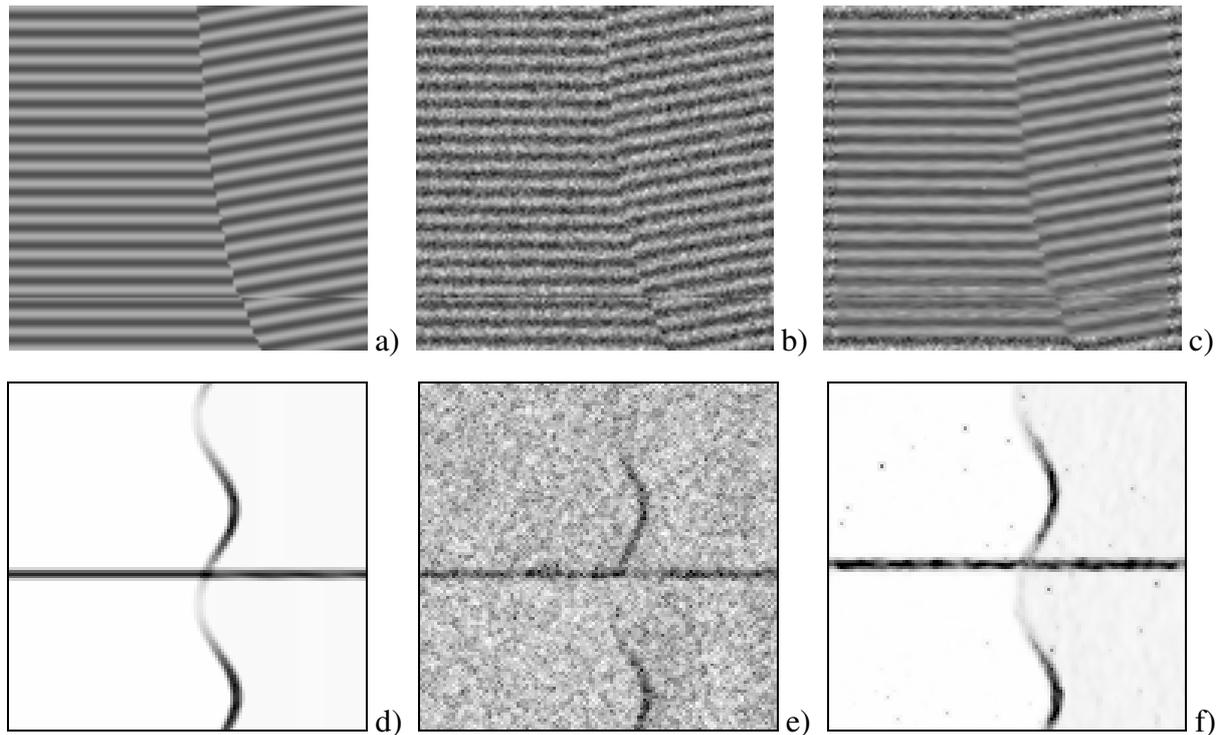


Fig.23 – Filtrage d'un bloc de synthèse. Vue de face (Inline) : a) bloc original b) bloc bruité c) bloc rehaussé par diffusion tangentielle. Détection des failles sur vue du dessus (Time-Slice) : d) dans le bloc original, e) dans le bloc bruité, f) dans le bloc diffusé.

La première approche directement dédiée à l'imagerie sismique que nous avons proposée est fondée sur une décomposition sectorielle du voisinage autour du voxel courant [T3]. En partant d'un formalisme de type EDP et en le généralisant pour un voisinage étendu, nous transformons notre solution sous la forme d'un filtre adaptatif ("Sector Based Diffusion Filtering"). L'extension du voisinage est une réponse apportée au problème du coût calculatoire.

Par la suite, en nous inspirant des travaux de Bakker [Bak02], nous avons proposé une variante du filtre conduisant à un rehaussement des failles. Ces approches ont fait l'objet d'un transfert auprès de notre partenaire Total et sont actuellement utilisées pour le traitement des blocs sismiques. Nous présentons quelques principes et résultats dans la section suivante.

La seconde solution est d'inspiration plus classique. En nous fondant sur le schéma de diffusion tensorielle CED de Weickert [Wei99], nous en proposons une extension au cas tridimensionnel en prenant en compte la structure particulière des données sismiques au voisinage des failles. La méthode obtenue ("Seismic Fault Preserving Diffusion") permet un fort lissage de la donnée sismique tout en assurant la préservation des discontinuités [A11][A14].

2.2 Filtre de diffusion sectorielle

Forme générale du filtre

La construction du filtre de diffusion sectorielle repose sur une extension 3D du modèle original de Perona-Malik [Per90] déjà décrit au chapitre précédent. Pour réduire le coût calculatoire, nous avons proposé de diminuer le nombre d'itérations en étendant le voisinage sur lequel porte la diffusion à chacune de ces itérations.

Dans le domaine continu, le filtre proposé correspond à :

$$\frac{\partial U}{\partial t}(\mathbf{x}, t) = \int_{\mathbf{v} \in V_r(\mathbf{x})} \frac{(U(\mathbf{v}, t) - U(\mathbf{x}, t)) g\left(\frac{U(\mathbf{v}, t) - U(\mathbf{x}, t)}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|}\right)}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|^2} d\mathbf{v} \quad (25)$$

où, contrairement à un schéma de diffusion classique, l'équation porte sur l'ensemble du voisinage V_r , i.e. sur l'ensemble des voisins dont la distance au point courant est inférieure à une borne r .

Ce schéma n'est pas un schéma de diffusion au sens strict du terme : il a été obtenu en utilisant l'écriture discrète du filtre de Perona-Malik.

En partant d'un schéma numérique semi-discret par différences finies, il est possible d'approcher l'équation de diffusion sous la forme d'une équation de filtrage puis d'étendre cette écriture à un voisinage quelconque. L'extension proposée à un voisinage de taille plus importante ne permet pas d'obtenir une expression exacte du filtre. Cependant nous avons montré qu'en pratique, l'approximation n'engendre aucune altération significative des résultats de filtrage pour des voisinages d'ordre 2 ou 3.

L'expression discrète du filtre se généralise donc pour un voisinage quelconque par :

$$U(\mathbf{x}, t + n \cdot dt) = U(\mathbf{x}, t) + dt \cdot \sum_{\mathbf{v} \in V_n(\mathbf{x})} \frac{(U(\mathbf{v}, t) - U(\mathbf{x}, t)) g\left(\frac{U(\mathbf{v}, t) - U(\mathbf{x}, t)}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|}\right)}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|^2} \quad (26)$$

Un retour dans le domaine continu permet d'obtenir l'expression du filtre sous la forme de l'équation d'évolution (25).

Adaptation du filtre à la sismique locale

Au delà de la forme générale du filtre, l'objectif est son adaptation au contexte sismique autour du point courant : ceci recouvre la prise en compte de l'orientation mais aussi celle de la dynamique locale ; enfin, nous verrons que la présence éventuelle de discontinuités doit conduire à une modification du processus de diffusion.

Au sein d'un même bloc sismique, la dynamique locale est fortement variable entre les zones dites "sourdes" et les zones dans lesquelles on note la présence de forts marqueurs (Fig. 24). Utiliser une fonction de diffusion $g(\cdot)$ non adaptée à cette dynamique conduirait à une suppression de tout signal dans les zones sourdes.

Nous avons proposé l'utilisation d'une limite de diffusion $K(\mathbf{x})$ (au sens de la limite de Perona-Malik intégrée à la fonction $g(\cdot)$) dépendante de la dynamique locale : $K(\mathbf{x}) = \alpha \cdot DL(\mathbf{x})$. La dynamique $DL(\mathbf{x})$ est estimée à partir des valeurs des maxima locaux le long des traces sismiques : l'amplitude locale est alors calculée par interpolation linéaire entre les deux maxima les plus proches.

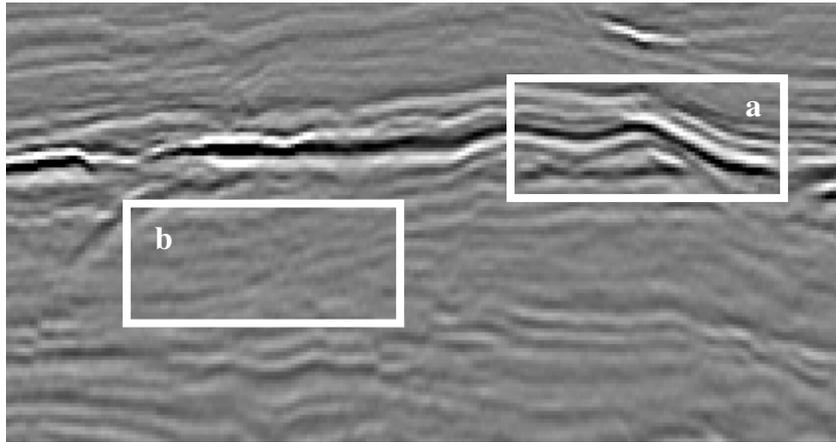


Fig.24 – Variabilité de la dynamique locale a) présence de forts marqueurs b) zone sourde

Dans un souci d'optimisation du coût calculatoire, la prise en compte de l'orientation locale est obtenue par une approche de type filtrage adaptatif. L'objectif est de pondérer les voxels du masque de diffusion en fonction de leur appartenance au même horizon que le point courant ou à un horizon différent [C27].

A partir de l'estimation de la direction de la normale au plan tangent (i.e. direction du premier vecteur propre du tenseur de structure 3D local), le masque de diffusion proposé prend la forme d'un partitionnement du voisinage en secteurs (Fig. 25).

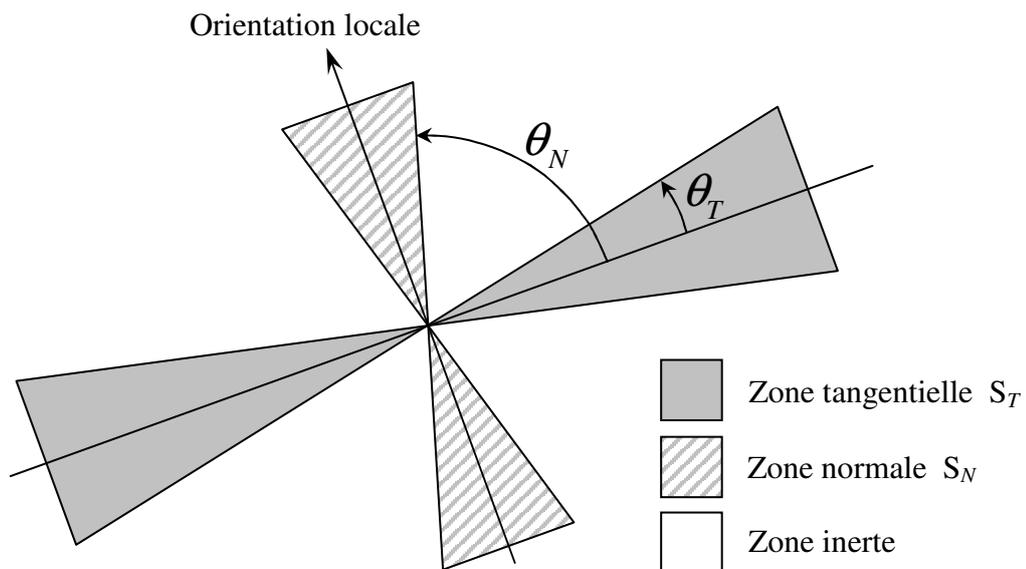


Fig.25 – Division sectorielle conique.

La forme biconique des secteurs est ici paramétrée par des ouvertures angulaires référencées au plan tangent. Pour un angle au plan tangent inférieur à θ_T , nous retrouvons l'ensemble des points supposés appartenir à l'horizon passant par le point central ; ils forment la *zone tangentielle* S_T . La *zone normale* S_N regroupe l'ensemble des points situés autour de la direction orthogonale au plan tangent qui sont considérés comme appartenant à des horizons distincts de l'horizon courant.

La pondération affectée à chaque point \mathbf{v} du voisinage prend la forme d'un coefficient $c(\mathbf{v})$ dépendant de sa position relative dans le masque :

$$\begin{cases} c(\mathbf{v}) = \frac{\cos \theta_{\mathbf{v}} - \cos \theta_T}{1 - \cos \theta_T} & \text{si } \mathbf{v} \text{ appartient à la zone tangentielle } S_T \\ c(\mathbf{v}) = 0 & \text{si } \mathbf{v} \text{ appartient à la zone inerte} \\ c(\mathbf{v}) = C_N \cdot \frac{\cos \theta_N - \cos \theta_{\mathbf{v}}}{\cos \theta_N} & \text{si } \mathbf{v} \text{ appartient à la zone normale } S_N \end{cases} \quad (27)$$

avec $C_N < 0$; $c(\mathbf{v})$ est maximal le long du plan tangent ; il est négatif autour de l'axe normal et tend vers zéro aux frontières des secteurs tangent et normal.

L'intégration de ce poids dans le processus de diffusion conduit à :

$$U(\mathbf{x}, t + n \cdot dt) = U(\mathbf{x}, t) + dt \cdot \sum_{\mathbf{v} \in V_n(\mathbf{x})} \frac{c(\mathbf{v}) \cdot (U(\mathbf{v}, t) - U(\mathbf{x}, t)) \cdot g\left(\frac{U(\mathbf{v}, t) - U(\mathbf{x}, t)}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|}, K(\mathbf{x}, t)\right)}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|^2} \quad (28)$$

La prise en compte des pondérations négatives autour de la normale au plan tangent permet d'induire un processus de rehaussement entre horizons voisins.

Nous avons également proposé un modèle légèrement plus complexe à base de secteurs hyperboliques permettant de modéliser des horizons ayant une certaine "épaisseur". L'objectif d'un tel modèle est de permettre la prise en compte de la résolution de l'image sur l'axe des temps (axe vertical). La figure 26 illustre ce découpage en secteurs hyperboliques.

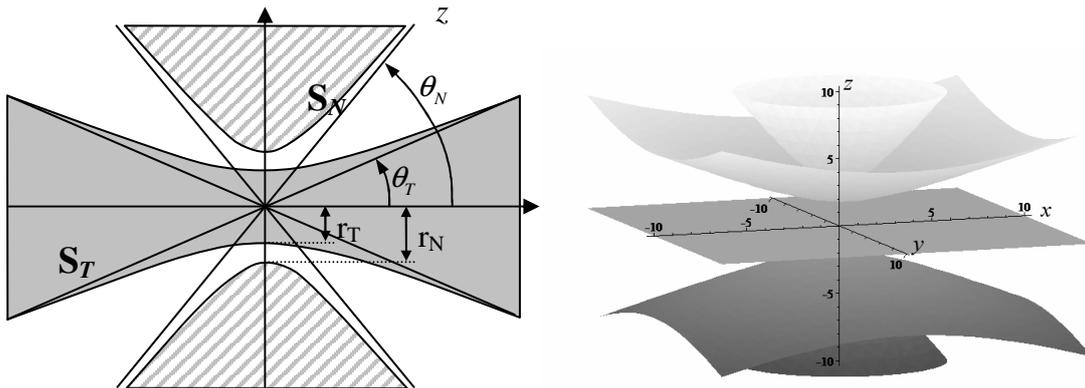


Fig.26 – Division sectorielle hyperbolique. Vues 2D et 3D.

Efficacité du filtre de diffusion sectorielle

Comme dans le cas de la diffusion directionnelle 2D, l'efficacité de la méthode de diffusion sectorielle a été démontrée en utilisant d'une part un plan d'expérience permettant la comparaison des méthodes de filtrage sur des données synthétiques puis, en collaboration

avec notre partenaire TOTAL, en observant le comportement des méthodes proposées dans le cas du traitement de données réelles.

La figure 27 représente une coupe 2D d'un bloc de synthèse, le même bloc bruité ainsi que les résultats obtenus par les méthodes dédiées au filtrage de données sismiques. Le bloc est constitué de régions homogènes comportant des couches isoclines superposées et périodiques. Ces régions sont définies par un pavage de Voronoï dont les frontières, assimilables à des discontinuités du signal, doivent être préservées lors du filtrage. Nous pouvons constater sur la figure 27 que la méthode de diffusion sectorielle (SBDF) conduit à un filtrage efficace des données tout en conservant de manière satisfaisante les frontières du pavage.

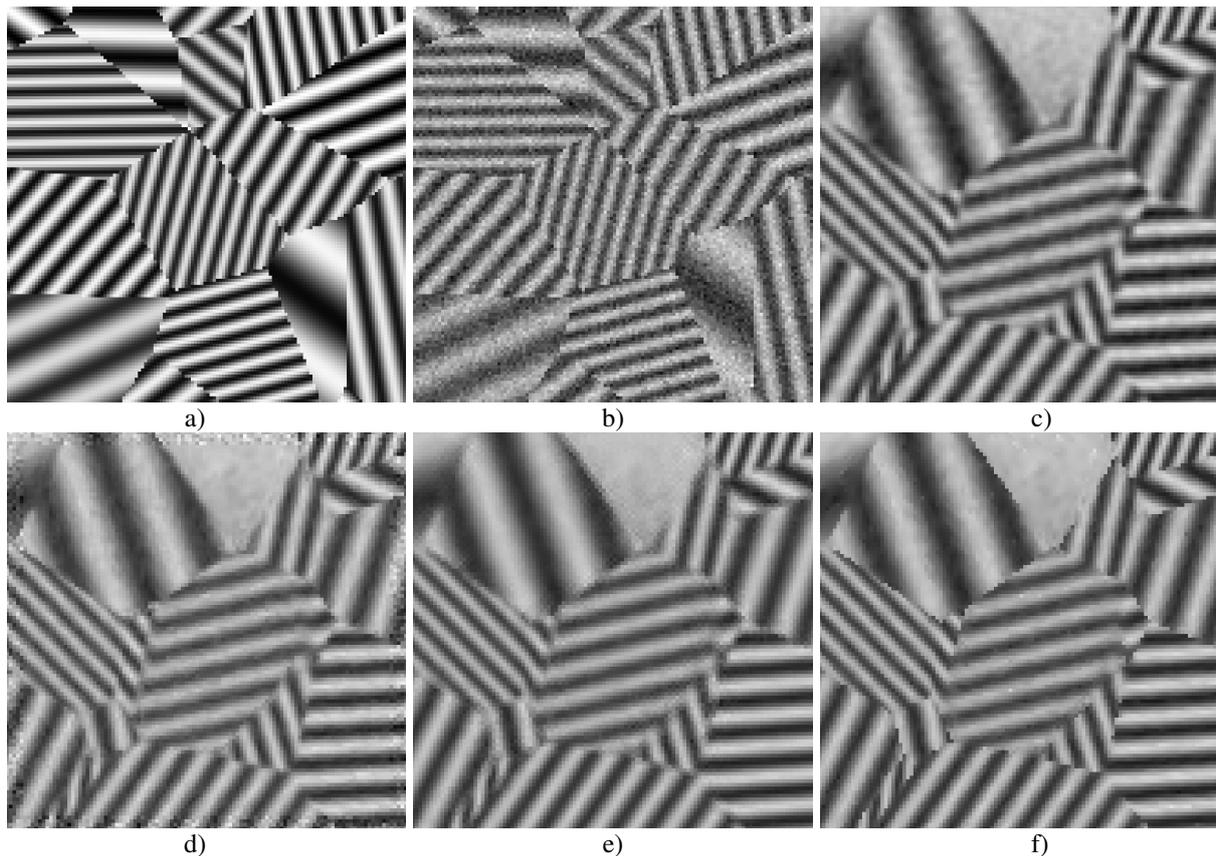


Fig.27 – Filtrage de blocs de synthèses. a) bloc original, b) bloc bruité (SNR = 18dB). Résultats : c) GLLÉ [Gui97], d) OAGF [Bak99], e) EPOAF [Bak02], f) Diffusion sectorielle SBDF (support conique) .

L'expérience menée dans [T3] a porté sur 15 blocs de synthèse et a permis de mettre en évidence l'amélioration significative des résultats de nos approches vis-à-vis des approches concurrentes en terme d'amélioration du rapport signal sur bruit (Figure 28). Notons également que nous avons montré la robustesse de nos méthodes aux changements de paramètres (taille du voisinage, constante de diffusion, taille du support du tenseur de structure) : ceci en fait des techniques simples à utiliser et faiblement supervisées.

La forme des secteurs (conique ou hyperbolique) n'influence pas de manière significative la qualité des résultats.

L'implémentation du filtre SBDF ayant été achevée chez notre partenaire Total à partir de décembre 2005, son efficacité pour le filtrage de données sismiques réelles est maintenant validée. Les figures 29 et 30 illustrent les résultats obtenus sur une section de bloc et sur un détail de cette section.

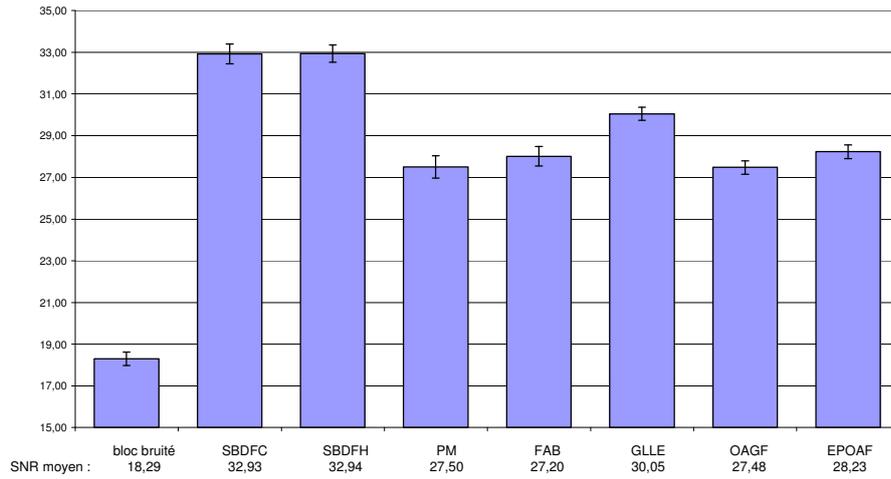


Fig.28 – Performances comparées des méthodes de filtrage de données texturées 3D. Les moyennes sont calculées sur 15 blocs, les barres d'erreurs indiquent les intervalles de confiance des SNR moyens.

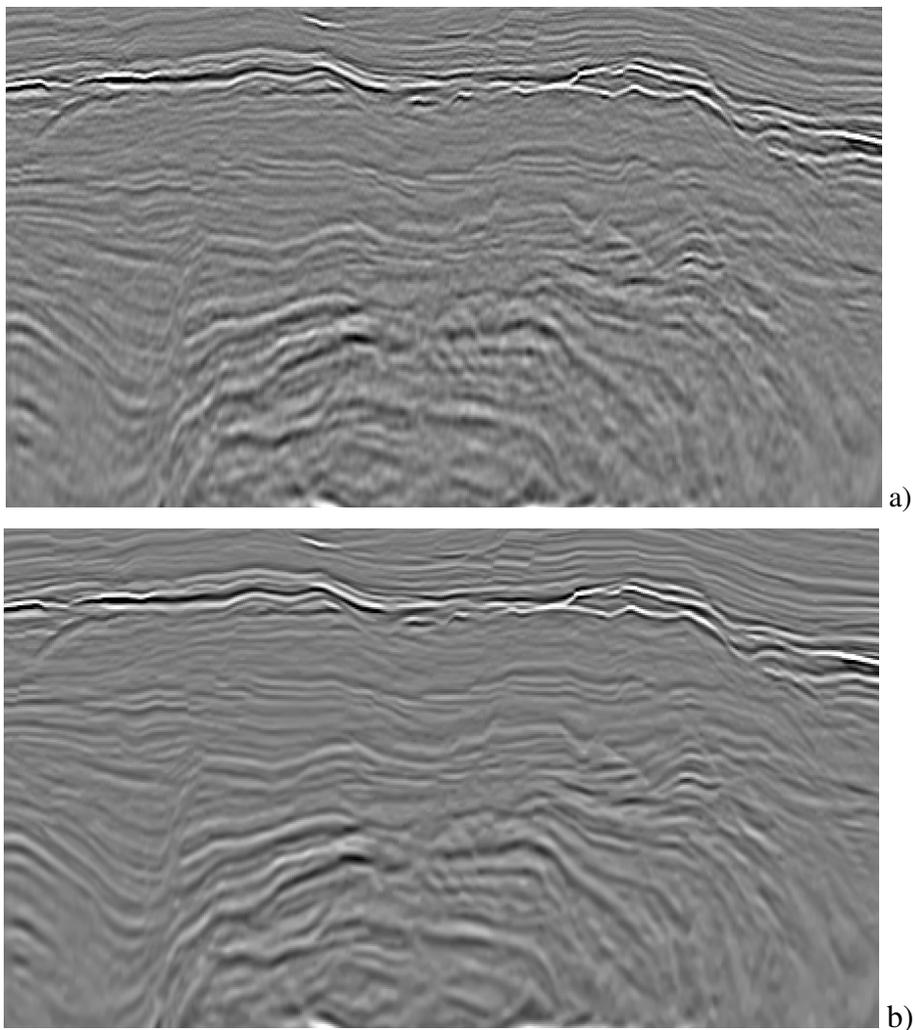


Fig.29 – Diffusion sectorielle SBDF. a) donnée d'origine b) résultat du filtrage

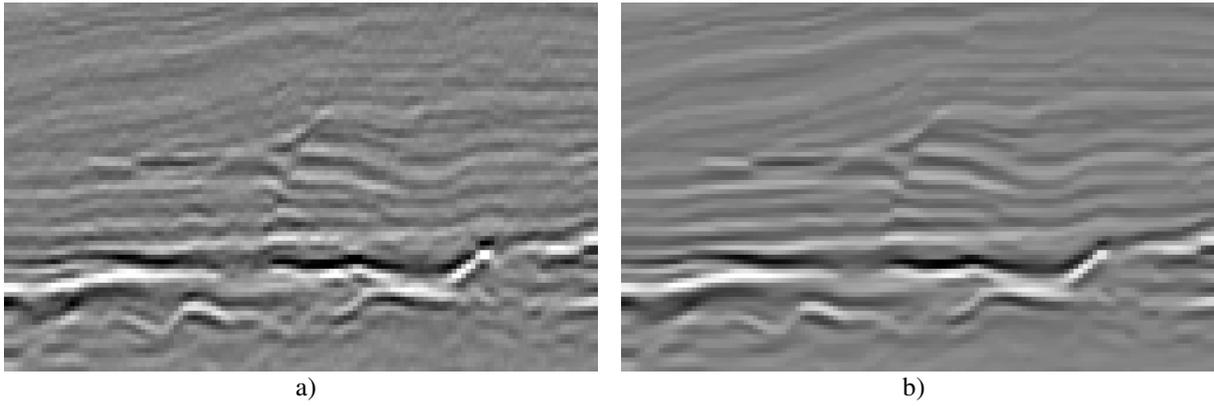


Fig.30 – Diffusion sectorielle SBDF. Détail : a) donnée d'origine b) résultat du filtrage

Une des problématiques du traitement des données sismiques est de s'affranchir des bruits d'acquisition. Parmi ces bruits certains se définissent par leur caractère périodique ainsi que par leur inclinaison forte. C'est en partie pour s'affranchir de ce type de bruit dit "structuré" qu'une approche fondée sur un filtrage fréquentiel a été proposée au sein de l'équipe [Aks06]. Pour autant, dès lors que l'énergie du bruit structuré est inférieure à celle du signal, l'estimation de l'orientation locale n'est pas en général perturbée et le filtrage sectoriel que nous proposons conduit à l'élimination totale du bruit structuré (Fig. 31).

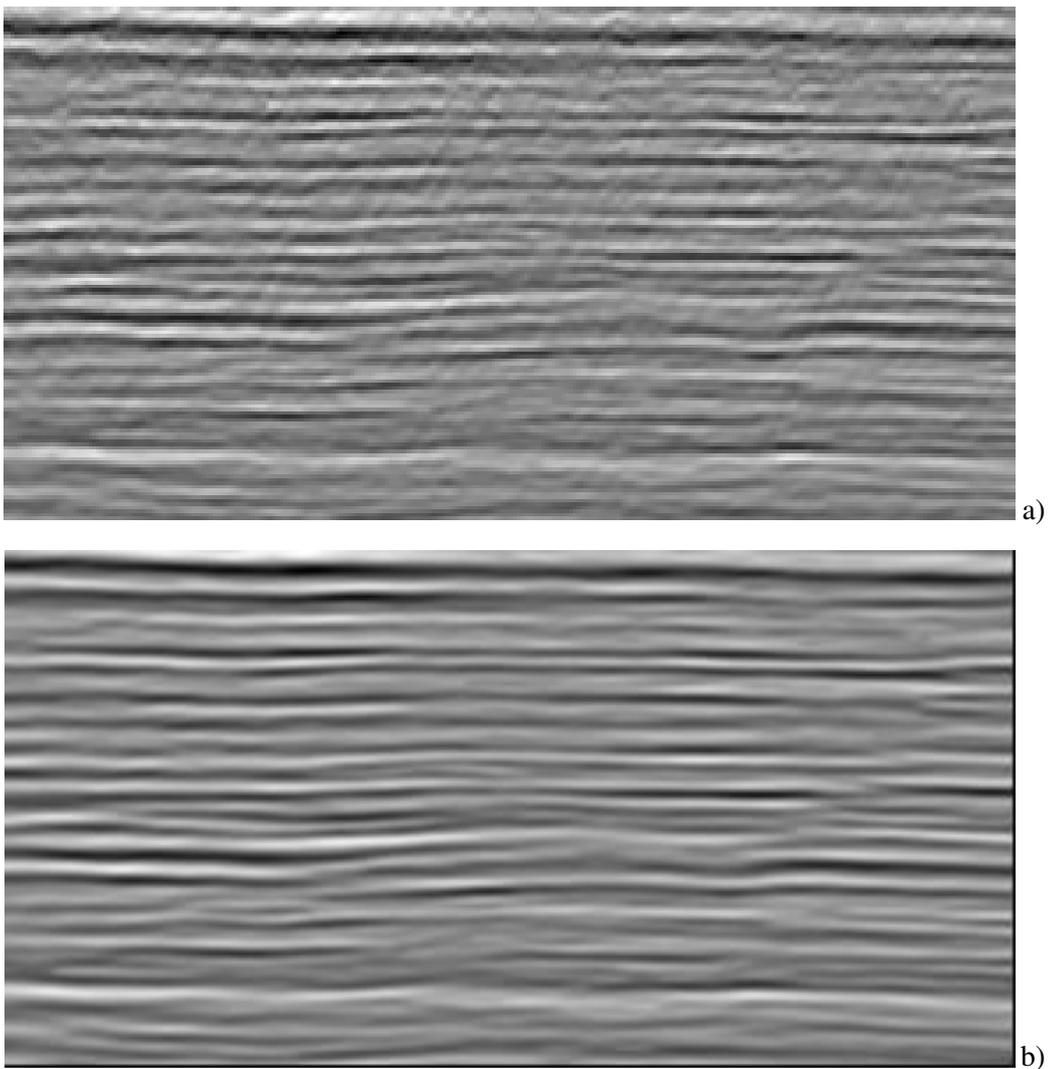


Fig.31 – Diffusion sectorielle SBDF. Elimination du bruit structuré a) image originale ; b) image filtré.

Un autre type de validation concerne la capacité du filtrage à améliorer les résultats du processus de détection automatique des failles. Lorsque cette détection s'appuie sur le calcul d'un attribut de cohérence des orientations locales, les cartes obtenues à partir des blocs originaux sont bruitées et entachées de nombreuses fausses alarmes. Le filtrage sectoriel permet d'obtenir des cartes de cohérences mieux contrastées et par suite, une localisation améliorée du réseau de failles (Fig. 32)

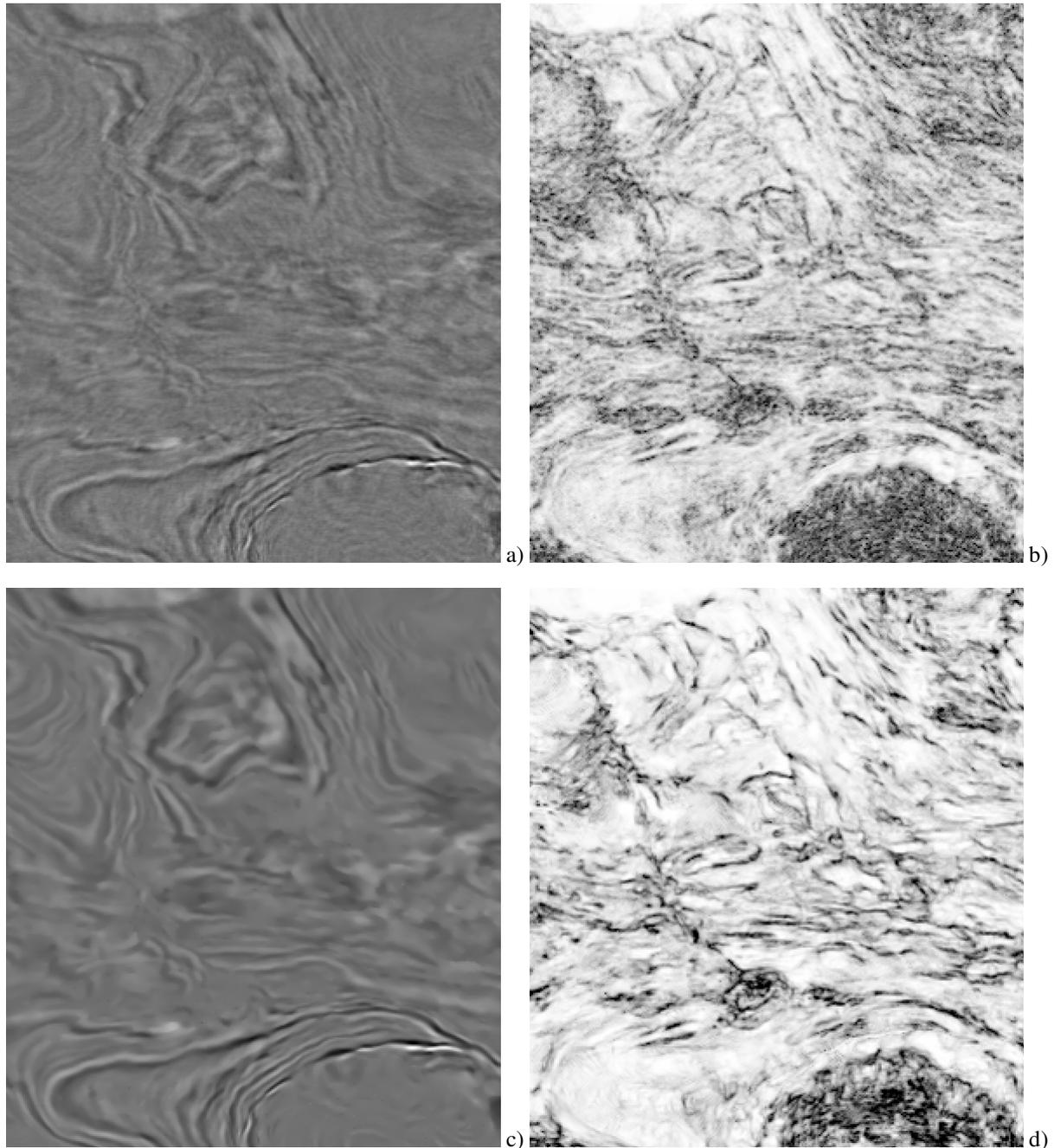


Fig.32 – Diffusion sectorielle SBDF. Vue Time-slice : a) donnée d'origine b) résultat de la détection de faille par un attribut de cohérence. c) donnée filtrée d) détection des failles sur le bloc filtré

Rehaussement des failles par diffusion sectorielle

Dans le but de faciliter la détection du réseau de failles et sa localisation par un opérateur humain, l'objectif n'est pas simplement la préservation des discontinuités mais leur rehaussement au cours du processus de filtrage. C'est le sens de la méthode de Bakker [Bak02] qui repose sur une généralisation du filtre de Kuwahara [Kuw76] ou du filtre de Nagao [Nag79] en proposant l'utilisation de supports gaussiens non centrés : l'objectif est la recherche du support contenant le point courant qui minimise une mesure de présence de faille (Fig 33).

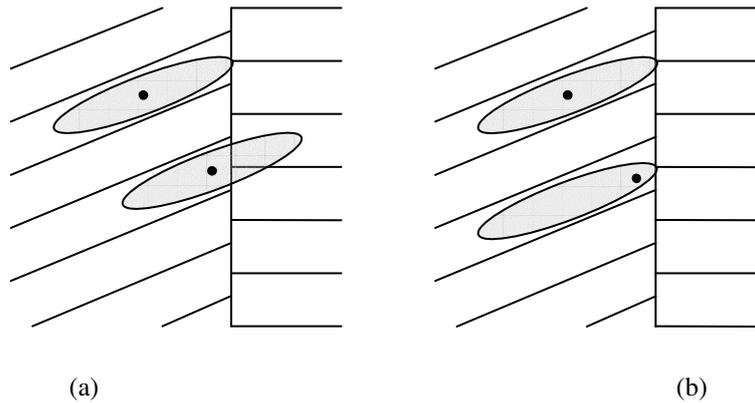


Fig.33 – Principe de la méthode de Bakker : décalage du support gaussien fondé sur l'attribut C_{fault}.

L'avantage de l'approche de Bakker est la mise en évidence de failles peu perceptibles sur les blocs originaux. Son inconvénient est qu'elle a tendance à induire une transformation importante des données, un déplacement des failles et la mise en évidence de nombreuses fausses alarmes.

Nous avons proposé d'introduire une approche similaire dans le cadre de la diffusion sectorielle. L'approche que nous avons retenue consiste à sélectionner au sein du support de filtrage initial, le support S_{coh} décentré maximisant une mesure de cohérence :

$$S_{coh} = Arg \max_{S_k} (c_{coh}(S_k)) \quad (29)$$

$$avec \quad c_{coh}(S_k) = moyennes_k(\min_{x,y} (coh(x, y, z))) \quad pour \quad (x, y, z) \in S_k$$

Le support cohérent S_{coh} , présente la plus petite chute de cohérence sur l'ensemble des plans horizontaux qui le constitue. Le rôle volontairement différent attribué à la profondeur z est dû à la forte tendance à la verticalité des failles.

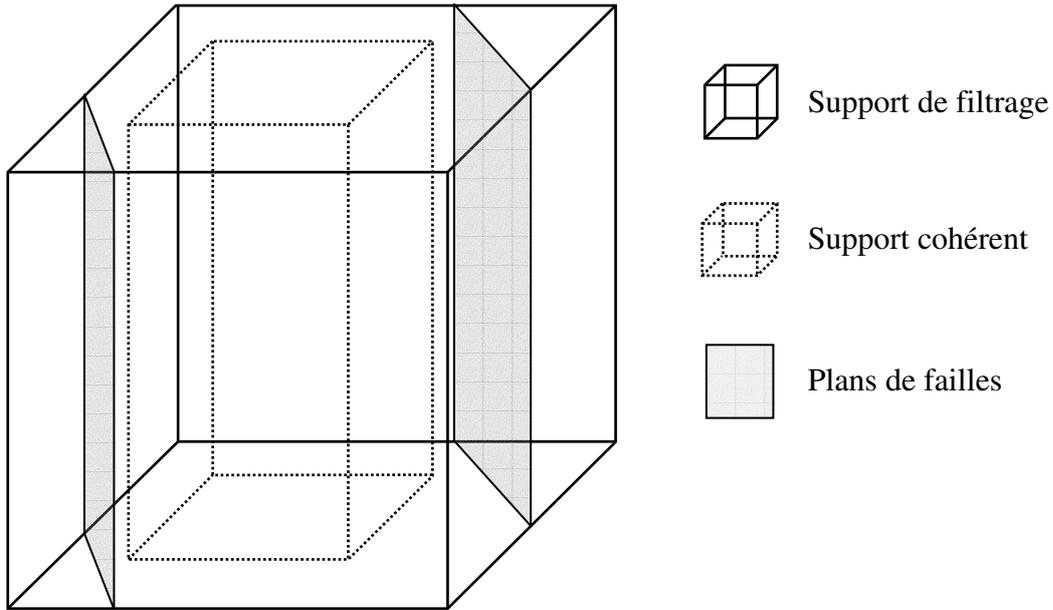


Fig.34 – Recherche du support cohérent.

Les régions homogènes présentent des réponses peu contrastées en terme de cohérence. Par suite, dans ces régions, le choix du *support cohérent* est conditionné par le bruit et conduit à la création de fausses discontinuités. Reprenant la solution proposée par Bakker, notre opérateur est construit comme une somme pondérée des résultats de diffusion obtenus d'une part sur le *support cohérent* S_{coh} et d'autre part sur le support centré S_0 :

$$U(\mathbf{x}, t + n.dt) = U(\mathbf{x}, t) + dt \cdot ((1 - \alpha(c_{coh}(S_{coh}); c_{coh}(S_0))) \cdot \Sigma_0 + \alpha(c_{coh}(S_{coh}); c_{coh}(S_0)) \cdot \Sigma_{coh}) \quad (30)$$

Les termes Σ_0 et Σ_{coh} sont les composantes diffusives calculées respectivement sur le support centré et le support cohérent :

$$\begin{aligned} \Sigma_0 &= \sum_{\mathbf{v} \in V_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}) \cap S_0} \frac{c(\mathbf{v})}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|} \cdot g_u \left(\frac{U(\mathbf{v}, \mathbf{t}) - U(\mathbf{x}, \mathbf{t})}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|}, K(\mathbf{x}, t) \right) \\ \Sigma_{coh} &= \sum_{\mathbf{v} \in V_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}) \cap S_{coh}} \frac{c(\mathbf{v})}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|} \cdot g_u \left(\frac{U(\mathbf{v}, \mathbf{t}) - U(\mathbf{x}, \mathbf{t})}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|}, K(\mathbf{x}, t) \right) \end{aligned} \quad (31)$$

La fonction $\alpha()$ permet de régler la part relative des supports dans la diffusion en fonction de leur coefficient de cohérence $c_{coh}()$ respectif.

La figure 35 illustre l'intérêt de l'approche de rehaussement utilisant la diffusion sectorielle. Le rehaussement permet de limiter le lissage des failles peu marquées (effet particulièrement visible dans les zones 1 et 2 en comparaison avec la diffusion sans rehaussement). Par rapport à l'approche de Bakker, le support de filtrage moins étendu conduit à la préservation et au rehaussement de failles même lorsque celles-ci sont très proches (zone 2).

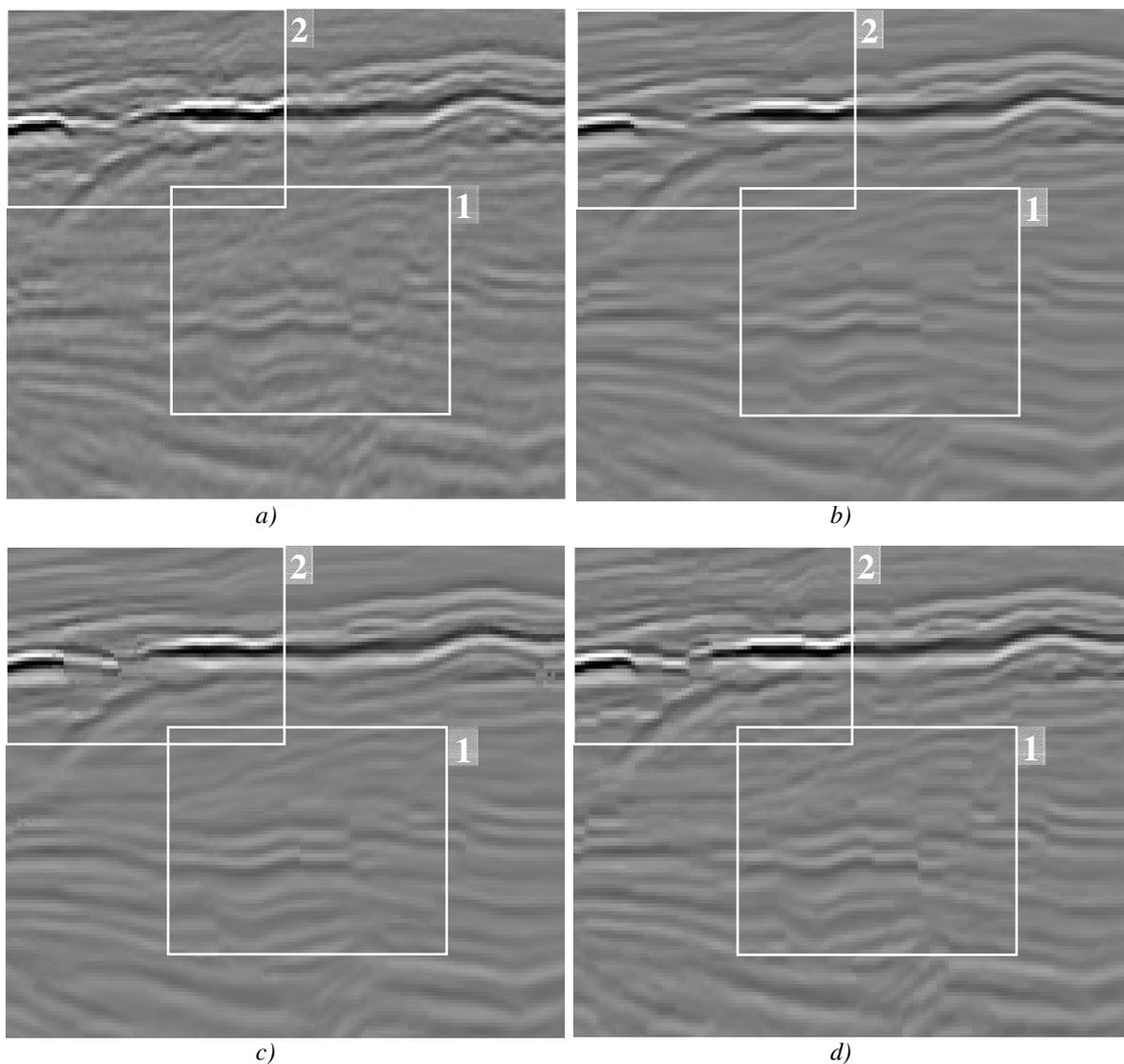


Fig.35 – Filtrage et rehaussement de failles. a) bloc original, b) Filtrage sectoriel sans rehaussement, c) Rehaussement par la méthode de Bakker [Bak02], d) Filtrage sectoriel avec rehaussement

L'étude des cartes de cohérence a largement confirmé l'intérêt de l'utilisation conjointe de la diffusion sectorielle et du principe de sélection du support cohérent. Les réseaux de failles obtenus sont mieux localisés et plus continus que ceux obtenus à l'aide de la méthode sans rehaussement d'une part et de la méthode de rehaussement de Bakker d'autre part (Fig. 36).

La méthode de filtrage sectoriel avec rehaussement des failles [C34] a fait l'objet d'une implantation chez notre partenaire Total en Avril 2006.

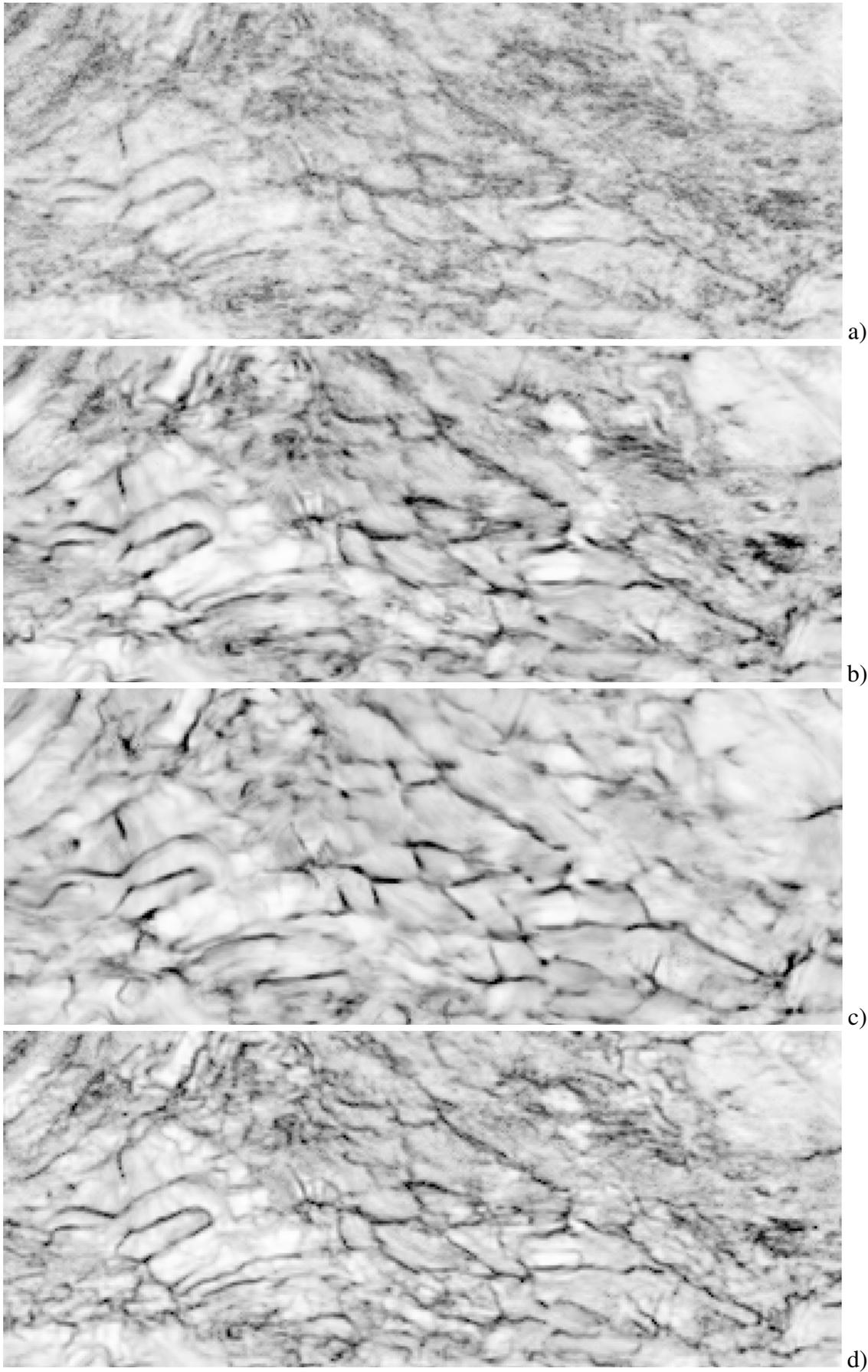


Fig.36 – Cartes de cohérence. a) bloc original, b) Filtrage sectoriel sans rehaussement, c) Rehaussement par la méthode de Bakker [Bak02], d) Filtrage sectoriel avec rehaussement

2.3 Diffusion tensorielle pour la sismique

(Seismic Fault Preserving Diffusion)

Comme dans le cas 2D, nous avons cherché à évaluer l'intérêt des approches tensorielles qui consistent à rechercher l'adaptation au contexte local à travers le calcul du tenseur de structure ; nous avons alors envisagé l'extension des méthodes de Weickert et leur adaptation au contexte de l'imagerie sismique.

L'extension directe du modèle Coherence Enhancing Diffusion de Weickert [Wei99] au cas de données 3-D s'appuie sur le tenseur de structure 3D :

$$J_\rho(\nabla U_\sigma) = K_\rho * \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial U_\sigma}{\partial x}\right)^2 & \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} & \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} \\ \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} & \left(\frac{\partial U_\sigma}{\partial y}\right)^2 & \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} \\ \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} & \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} & \left(\frac{\partial U_\sigma}{\partial z}\right)^2 \end{pmatrix} \quad (32)$$

où U_σ est une version lissée de la donnée originale. σ est l'échelle locale qui représente la taille des objets à préserver et ρ est l'échelle d'intégration permettant un lissage par le noyau K_ρ de l'orientation des structures. Dans le cadre de la diffusion 3D, Weickert propose d'utiliser le modèle de diffusion tensorielle :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \text{div}(D\nabla U) \quad (33)$$

La matrice de diffusion D possède les mêmes vecteurs que le tenseur de structure et des valeurs propres définies par :

$$\lambda_3 = \begin{cases} \alpha & \text{si } k = 0 \\ \alpha + (1 - \alpha) \exp\left(\frac{-C}{k}\right) & \text{sinon} \end{cases} \quad (34)$$

k est une mesure de cohérence mesurée localement ($k = (\mu_1 - \mu_2)^2 + (\mu_1 - \mu_3)^2 + (\mu_2 - \mu_3)^2$) où μ_1, μ_2 et μ_3 sont les valeurs propres de J_ρ rangées par ordre décroissant.

Cette formulation (que nous notons CED-1D) conduit à une diffusion des structures linéaires 1D dans l'espace 3D, ce qui n'apparaît pas pertinent dans le cas du filtrage des horizons sismiques planaires. Pour traiter le cas des structures planaires, nous pouvons simplement réécrire le système précédent sous la forme :

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \begin{cases} \alpha & \text{si } k = 0 \\ \alpha + (1 - \alpha) \exp\left(\frac{-C}{k}\right) & \text{sinon} \end{cases} \quad (35)$$

Cette approche que nous avons baptisée CED-2D est adaptée au filtrage des structures planaires. Le processus de diffusion qui en découle agit le long des horizons sismiques sans tenir compte de la présence des discontinuités. Par suite, le résultat est un lissage du signal à travers les plans de failles et une perte de l'information pertinente.

En nous fondant sur la notion de dimensionnalité des structures définie par Van Kampen et al [Van99], nous proposons d'assimiler les horizons à des structures planaires caractérisées, au niveau du tenseur de structure par une seule forte valeur propre ; l'intersection d'un plan de faille conduit par contre localement à deux dimensions de désordre caractéristiques d'une structure 1D. En 2001, Bakker et al [Bak01] ont, à partir des travaux de Bigun et al [Big91], proposé deux mesures permettant de caractériser la dimensionnalité des structures :

$$C_{plane} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \quad C_{line} = \frac{\mu_2 - \mu_3}{\mu_2 + \mu_3} \quad (36)$$

En combinant ces mesures, ils proposent un indicateur de présence de faille :

$$C_{fault} = C_{line} (1 - C_{plane}) \quad (37)$$

Nous proposons la prise en compte de cet indicateur dans les coefficients de la matrice de diffusion CED pour en obtenir une formulation adaptative en fonction de la dimensionnalité de la structure locale :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \alpha \\ \lambda_2 &= \lambda_3 - (\lambda_3 - \lambda_1) h_\tau(C_{fault}) \\ \lambda_3 &= \begin{cases} \alpha & \text{si } k = 0 \\ \alpha + (1 - \alpha) \exp\left(\frac{-C}{k}\right) & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned} \quad (38)$$

La fonction h_τ est une fonction sigmoïde croissante qui permet de moduler le passage entre les zones planaires et les zones de failles [A10].

Autour des zones faillées ($h_\tau(C_{fault}) \approx 1$), le processus de diffusion s'effectue le long d'une seule dimension parallèle au plan de faille (3^{ème} vecteur propre). Dans les régions planaires, le système conduit à une diffusion sur le plan décrit par les 2^{ème} et 3^{ème} vecteurs propres.

Cette approche peut être baptisée CED- τ D par référence aux deux autres méthodes de diffusion tensorielles exposées précédemment. Dans le cadre de l'article [A11], nous l'avons dénommée "Seismic Fault Preserving Diffusion" (SFPD).

Les résultats obtenus sur des blocs de synthèse reflètent le comportement des trois approches tensorielles décrites dans ce paragraphe. La figure 37 montre un bloc traversé par une faille proche de la verticale. En présence d'un bruit de niveau très important (SNR=1dB), la faille n'est plus perceptible. La méthode CED-1D renforce nettement la faille mais conduit à un filtrage très relatif des structures planaires. La méthode CED-2D filtre les structures planaires de manière efficace mais entraîne la perte de la discontinuité. Finalement notre approche CED- τ D, en s'adaptant à la dimensionnalité de la donnée conduit à un filtrage de bonne qualité tout en préservant la faille.

Ces observations sont confirmées sur la vue d'une coupe horizontale (Fig. 38). On y observe notamment les conséquences de l'utilisation de la méthode CED-1D qui entraîne la création de structures 1D parasites qui perturbent le filtrage de la donnée.

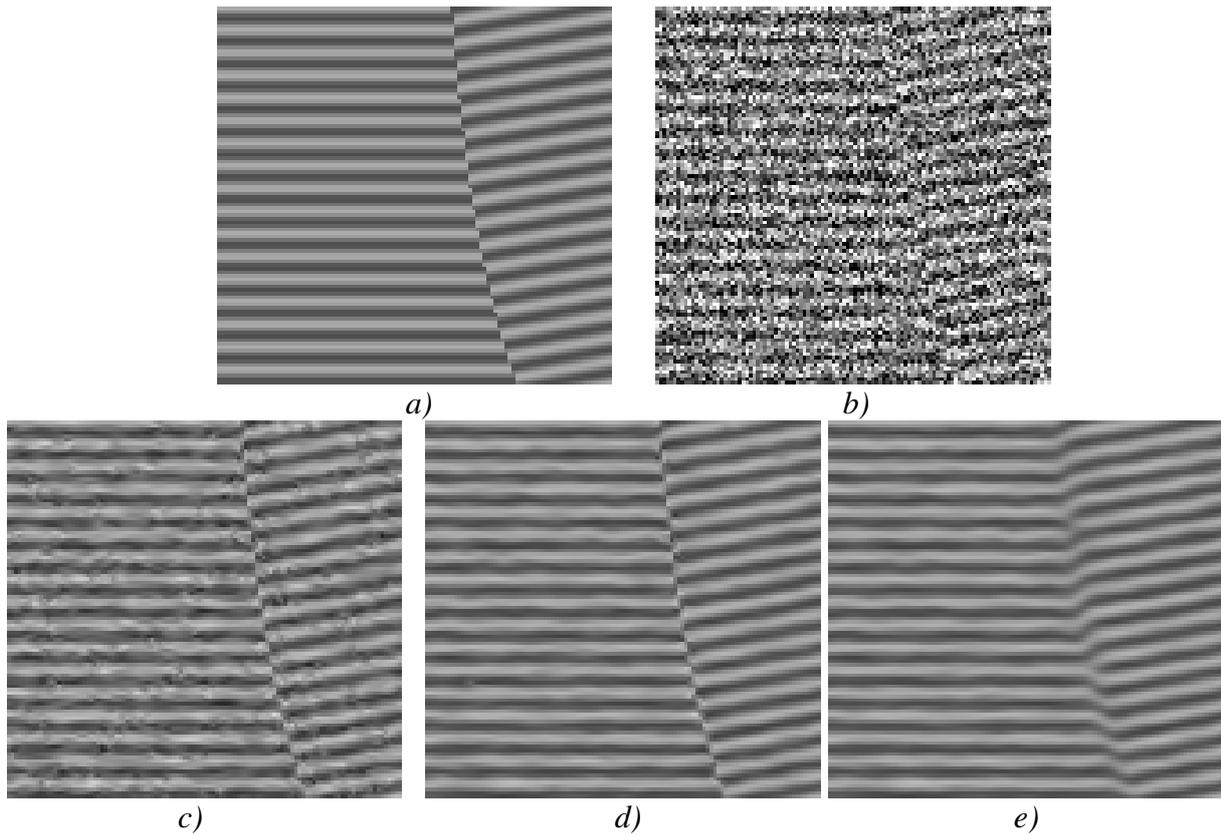


Fig.37 – Diffusion tensorielle d'un bloc de synthèse. a) bloc original, b) bloc bruité (SNR=1dB), Résultats : c) CED-1D, d) CED- τ D (SFPD), e) CED-2D

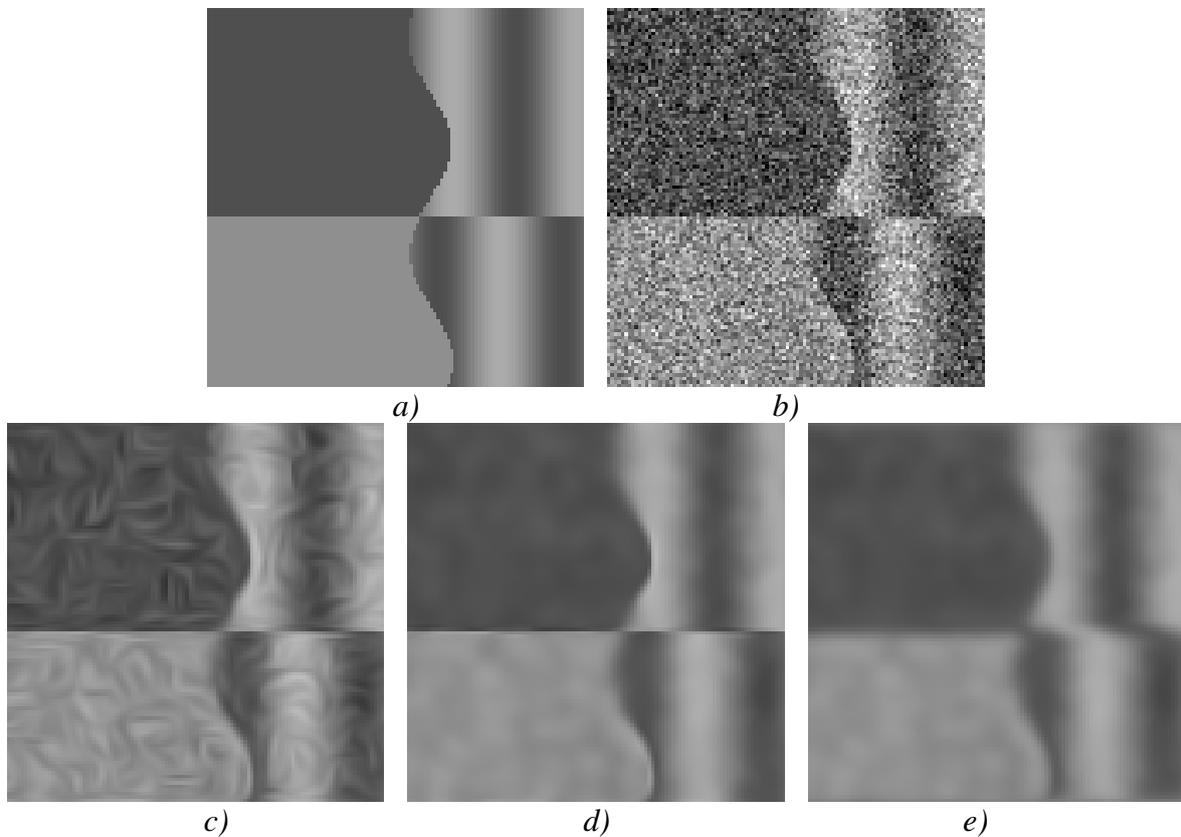


Fig.38 – Diffusion tensorielle d'une bloc de synthèse – Coupe horizontale. a) bloc original, b) bloc bruité (SNR=3dB), Résultats : c) CED-1D, d) CED- τ D (SFPD), e) CED-2D

Chapitre 3 : Fusion par EDP

2.1 Sismique multi-azimutale

Les techniques d'acquisition en sismique de réflexion sont en constante évolution pour permettre d'appréhender des zones de grande complexité géologique. Parmi les nouvelles technologies mises en œuvre, l'acquisition multi-azimutale consiste à capter les ondes sismiques réfléchies par le sous-sol dans plusieurs directions (et non plus sous un angle unique). « *Maîtriser et optimiser l'acquisition multi-azimutale et accéder ainsi à des zones plus difficiles encore* » figure parmi les objectifs majeurs énoncés par notre partenaire industriel.

Les données recueillies par cette technique se présentent sous la forme d'un ensemble de blocs supposés spatialement parfaitement recalés. L'objectif est alors de détecter et de combiner les informations pertinentes contenues dans chacun des blocs pour aboutir à un résultat de meilleure qualité que celle des données initiales. En ce sens le traitement des données azimutales peut être assimilé à un problème de fusion multi-capteurs.

La figure 39 montre un extrait de trois blocs résultant d'une acquisition multi-azimutale d'une même région géologique : nous pouvons remarquer un certain nombre de différences tant en ce qui concerne le niveau de bruit structuré qui semble plus important dans le bloc central qu'en ce qui concerne la présence de discontinuités n'apparaissant pas systématiquement dans les différents blocs.

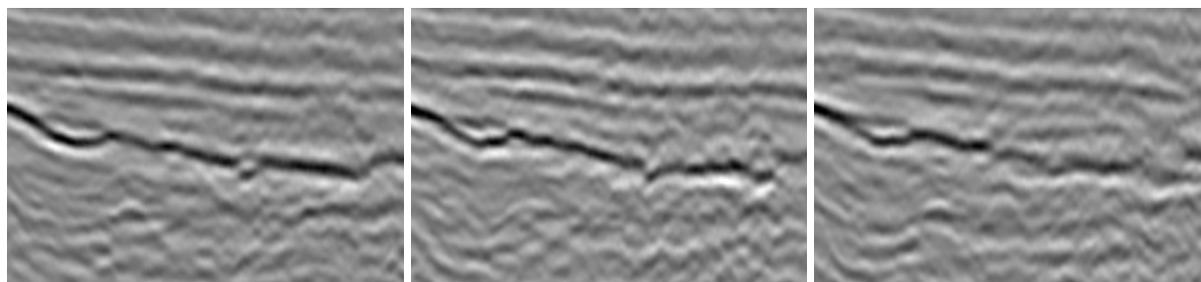


Fig.39 – Portions de 3 blocs sismiques - acquisition multi-azimutale

Depuis une quinzaine d'années, un grand nombre de travaux ont été dédiés à la problématique de la fusion multi-capteurs [Blu05]. Parmi ces méthodes, beaucoup sont fondées sur le principe de décomposition pyramidale [Bur93][Pie03], sur les transformées en ondelettes [Roc97] ou plus simplement sur différents opérateurs permettant une combinaison pondérée des sources [Roc98]. Ces techniques ont été largement appliquées dans le domaine de l'imagerie médicale pour des données 2D et 3D et dans le domaine de l'imagerie de télédétection.

Depuis 2005, à travers les travaux de thèse de Sorin Pop [T4], nous développons une approche originale permettant d'opérer un processus de fusion à partir d'un formalisme à base d'Equations aux Dérivées Partielles.

Cette nouvelle approche présente le double intérêt de permettre la réalisation conjointe d'un processus de fusion et d'un processus de diffusion conduisant au filtrage des données. De plus, l'écriture du processus de fusion sous forme d'une EDP permet la prise en considération du

contexte local (orientation, dynamique locale) et des spécificités des données sismiques. De manière plus générale, nous pensons que le formalisme EDP offre un cadre théorique qui permet d'appréhender le processus de fusion en lui conférant un caractère adaptatif et anisotrope.

Les travaux que nous présentons ont été développés dans le cadre restreint de la sismique multi-azimutale mais sont transposables à de nombreuses autres problématiques. Ils sont actuellement en cours d'évaluation chez notre partenaire et ont fait l'objet d'une valorisation académique au cours de l'année 2007 [C38] [C39] [C40] [A16].

2.2 Fusion-Diffusion Sectorielle

Depuis le "high-pass filtering" introduit par Chavez et al [Cha91], l'efficacité des méthodes multi-résolution de fusion qui consistent à produire une sortie dans laquelle a été injectée l'information haute fréquence de chaque source a été démontrée.

Notre objectif a été de reprendre cette démarche dans le cadre du formalisme EDP en proposant la préservation et le rehaussement de l'information pertinente à travers l'inversion d'un processus de diffusion par ailleurs proposée par Gilboa et al [Gil02] sous le terme de "Backward diffusion" pour des problématique de rehaussement ; nous avons déjà envisagé son utilisation dans le cadre de la diffusion sectorielle pour la sismique dans le but de rehausser les contrastes dans la direction de la normale aux structures.

Nos approches sont fondées sur le principe de fusion croisée : une équation d'évolution est appliquée à chaque source. Au cours du processus, les sources évoluent en parallèle ; l'injection dans une donnée de l'information en provenance des autres sources est réalisée à travers une diffusion inverse. In fine, l'intérêt de notre méthode est d'assurer la convergence de l'ensemble des évolutions vers une sortie regroupant les informations les plus pertinentes.

Dans le cadre des applications en sismique multi-azimutale, nous avons en premier lieu proposé une extension directe des modèles de diffusion sectorielle présentés dans le chapitre précédent.

Soit le voxel \mathbf{x} du bloc AZ_0 que nous souhaitons faire évoluer (appelé dans la suite « bloc à diffuser »). Nous construisons autour de ce voxel le découpage sectoriel en 3 zones (zone tangentielle S_T , zone normale S_N et Zone inerte) tel qu'il est défini dans notre approche de diffusion sectorielle. Ce découpage est effectué dans les mêmes conditions sur AZ_0 et sur l'ensemble des blocs « diffusants » AZ_J ($J \neq 0$).

Par suite, en considérant uniquement les voxels situés dans la zone tangente, nous proposons de rechercher les discontinuités existantes sur l'ensemble des blocs pour les préserver ou les incorporer dans le bloc à diffuser.

Pour tout voxel $\mathbf{v} \in S_T$, nous recherchons le bloc J solution de :

$$J = \text{Arg max}_K (U_K(\mathbf{x}, t) - U_K(\mathbf{v}, t)) \quad (39)$$

où $U_K(\mathbf{v}, t)$ est l'intensité du voxel \mathbf{v} dans le bloc K au temps t .

L'équation (39) conduit à sélectionner le bloc pour lequel la différence observée entre le voxel \mathbf{v} et le voxel central est maximum. C'est cette information qui sera ensuite utilisée dans l'EDP de fusion :

$$U_0(\mathbf{x}, t + n.dt) = U_0(\mathbf{x}, t) + dt. \sum_{\mathbf{v} \in V(\mathbf{x})} \frac{c(\mathbf{v}, \mathbf{J})(U_{\mathbf{J}}(\mathbf{v}, t) - U_{\mathbf{J}}(\mathbf{x}, t)) \cdot g\left(\frac{|U_{\mathbf{J}}(\mathbf{v}, t) - U_{\mathbf{J}}(\mathbf{x}, t)|}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|}\right)}{\|\mathbf{v} - \mathbf{x}\|^2} \quad (40)$$

$$\text{où } \begin{cases} c(\mathbf{v}, \mathbf{0}) > 0 \text{ pour } \mathbf{v} \in S_{\mathbb{T}} \\ c(\mathbf{v}, \mathbf{J}) < 0 \text{ pour } \mathbf{J} \neq \mathbf{0} \text{ et } \mathbf{v} \in S_{\mathbb{T}} \\ c(\mathbf{v}, \mathbf{J}) = 0 \text{ pour } \mathbf{v} \notin S_{\mathbb{T}}, \forall \mathbf{J} \end{cases} \quad \text{et } \mathbf{J} = \text{Arg max}_{\mathbf{K}} (U_{\mathbf{K}}(\mathbf{v}, t) - U_{\mathbf{K}}(\mathbf{x}, t))$$

Les coefficients $c(\mathbf{v}, \mathbf{J})$ sont choisis de manière à obtenir le résultat souhaité : lorsque la discontinuité maximum est observée sur le bloc à diffuser ($\mathbf{J}=\mathbf{0}$), alors la diffusion s'opère classiquement. Si au contraire, nous observons un événement sismique dans un des blocs « diffusants », alors le coefficient de diffusion négatif entraîne un processus de rehaussement : la discontinuité est ainsi « injectée » dans le bloc à diffuser.

L'EDP de fusion (40) induit des phénomènes de rehaussement. Ces phénomènes sont recherchés pour injecter les discontinuités d'un bloc à l'autre ; en contrepartie, tout rehaussement peut conduire à une dégradation très forte du signal, particulièrement en présence d'un fort niveau de bruit.

Nous proposons donc une démarche qui repose sur une alternance de phases de Diffusion (diffusion sectorielle "SBDF") et de Fusion. Les phases de diffusion permettent à la fois de préparer les blocs à la fusion en réduisant le niveau de bruit et de nettoyer les blocs obtenus une fois le processus de fusion réalisé (pré et post filtrage).

La figure 40 présente une séquence standard définie dans le cadre des applications sismiques dans le cas de 3 blocs de départ (notés AZ_1 à AZ_3).

L'algorithme permet l'évolution parallèle des blocs ; il a donc pour résultat la création d'autant de blocs de sortie que de blocs d'entrée. L'utilisation conjointe des phases de diffusion et de fusion assure une convergence des blocs de sortie. L'identité des blocs résultats pourrait être obtenue en itérant suffisamment le processus, mais au prix d'une dégradation sans doute très importante de l'information sismique.

Nous avons par ailleurs introduit un critère d'arrêt du processus de fusion fondé sur la distance inter-blocs.

Cette approche de fusion-diffusion sectorielle a été transférée chez notre partenaire où elle est en cours d'expérimentation sur des données multi-azimutales en provenance d'un site d'exploration. La figure 41 illustre, sur un extrait des blocs l'apport de notre approche. Les détails que nous soulignons mettent en évidence le transfert des discontinuités d'un bloc à l'autre. La proximité des blocs de sortie est perceptible.

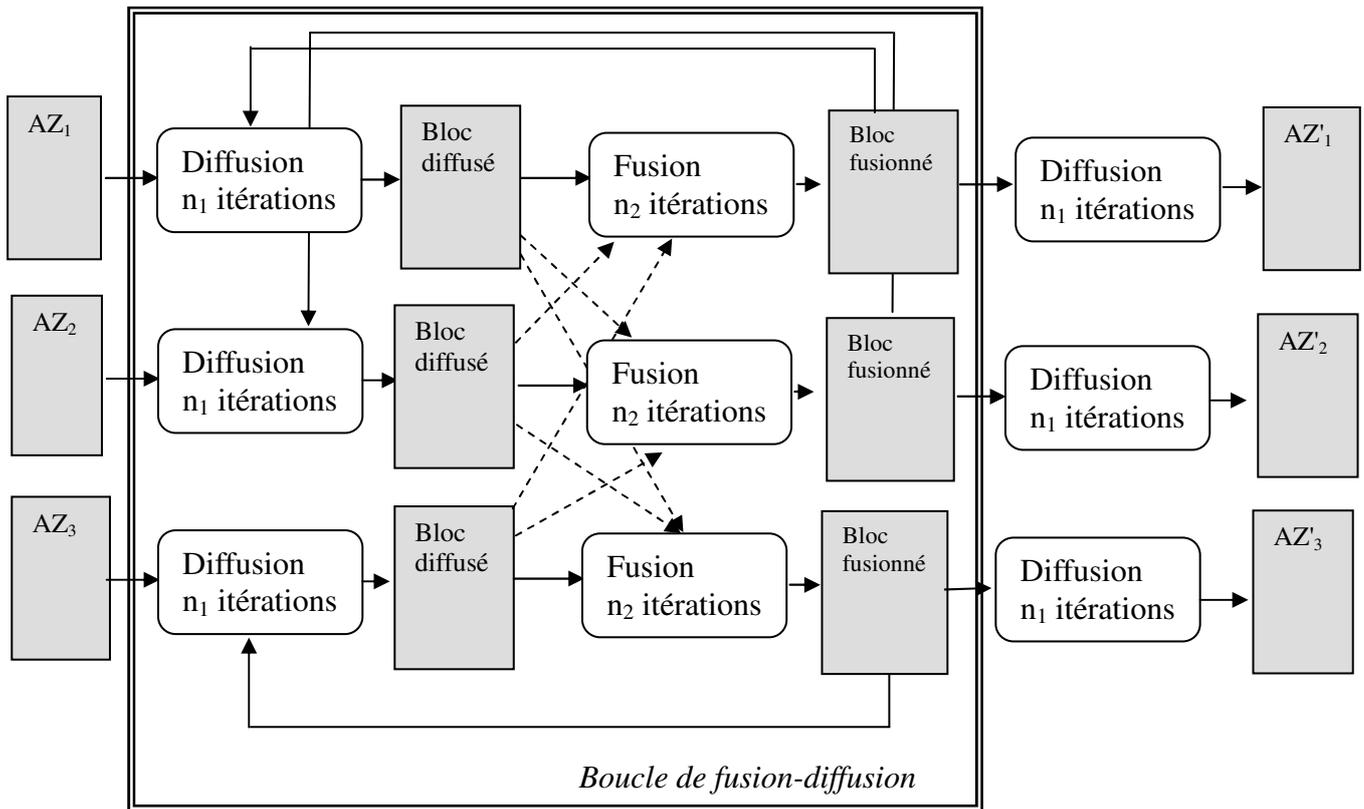


Fig.40 – Séquence de fusion multi-azimutale pour 3 blocs (AZ1, AZ2 et AZ3)

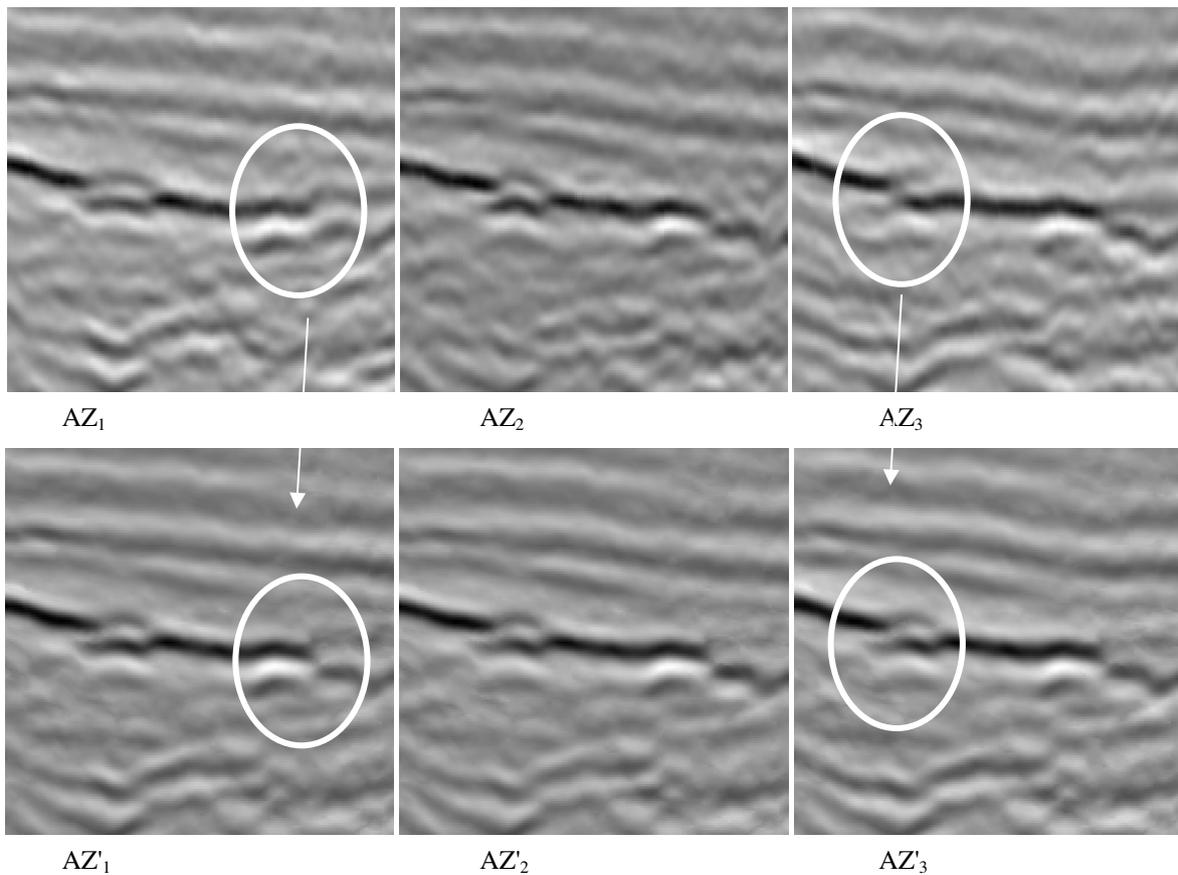


Fig.41 – Fusion multi-azimutale : blocs d'origine (en haut) et bloc fusionnés correspondants (en dessous)

2.3 Unification du processus de fusion-Diffusion

Le schéma de Fusion-Diffusion sectorielle réclame l'utilisation de séquences alternées de fusion et de diffusion. De plus, si dans la pratique la convergence des blocs semble assurée, il est difficile dans le cadre de l'écriture précédente de parvenir à démontrer cette convergence. Enfin, le schéma d'évolution comportant un nombre fixé de séquences de fusion puis de diffusion peut sembler arbitraire.

Nous avons cherché à formaliser l'ensemble du processus sous la forme d'une EDP unique et simplifiée. Sa forme générale, indépendante de la dimensionnalité du problème (1D, 2D ou 3D) est :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = \text{div}(g(|\nabla U_{\sigma_i}|)\nabla U_i) - \beta_i \cdot \text{div}(g_F(|\nabla U|_{\max})\nabla U_{\max}) + \gamma \cdot \text{div}(g_R(\nabla U_i, \nabla U_k^{t=0})\nabla U_i) \quad (41)$$

Cette équation d'évolution (où i représente la source courante) comporte trois termes :

- le premier terme est un terme de diffusion anisotrope. Nous l'écrivons sous la forme de la version lissée de la diffusion de Perona-Malik proposée par Catté et al [Cat92]. Cette forme a un caractère très général et pourra, comme nous le verrons sur l'application 3D, prendre la forme d'une diffusion tensorielle.

- le terme de fusion est défini comme un terme de diffusion inverse. "max" est l'indice de la source qui maximise le gradient local et β_i est défini par :

$$\beta_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \max = i \\ \beta \in [0;1] & \text{sinon} \end{cases} \quad (42)$$

Ce terme est non nul lorsque l'information est contenue dans une source différente de la source courante. Cette information est alors injectée. Le poids du terme de fusion est paramétré par β . Notons qu'à l'heure actuelle nos méthodes de fusion-diffusion opèrent une fusion isotrope à travers le choix d'une fonction g_F constante. Une version avec fusion anisotrope est en préparation.

- le dernier terme est un terme de régularisation : il agit comme un terme d'attache aux données initiales et permet de prévenir l'apparition de faux contours lors du processus de fusion.

La figure 42 illustre le fonctionnement de ce terme à travers un exemple simple de fusion de deux signaux 1D. L'injection du signal B conduit à l'apparition de deux pics dans le signal A (injection des hautes fréquences) ; en absence de régularisation, ces pics qui n'existaient pas dans les sources sont à nouveau injectés dans le signal B et le processus tend à créer une succession de nouveaux maxima locaux. Le terme de régularisation permet de conserver la forme générale du signal B et conduit à la convergence des deux signaux vers la solution recherchée.

Notons que comme pour la diffusion, l'utilisation de la fusion sur un signal numérique discret réclame un schéma numérique approprié. Nous avons adopté un schéma explicite fondé sur les différences finies.

De plus, nous imposons le principe de maximum discret en introduisant une contrainte de stabilité sur les amplitudes maximum en chaque point ; à chaque itération, l'amplitude est

bornée par les amplitudes minimum et maximum observées sur l'ensemble des sources à l'itération précédente :

$$\min_k(U_k^t) \leq U_i^{t+1} \leq \max_k(U_k^t) \quad (43)$$

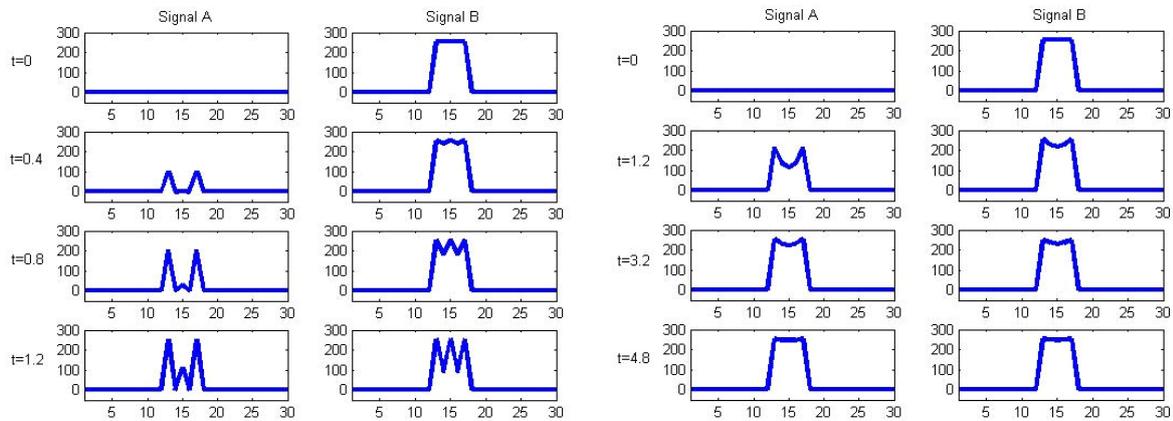


Fig.42 – Processus de fusion 1D : intérêt du terme de régularisation (séquence de droite)

L'implantation numérique très simple permet l'extension immédiate du cas 1D aux cas multidimensionnels.

En ce qui concerne la fusion d'image (2D), dans le but de comparer notre démarche aux approches les plus classiquement utilisées, l'EDP de Fusion-Diffusion-Régularisation est utilisée sur un jeu de deux images présentant des défauts de focalisation distincts.

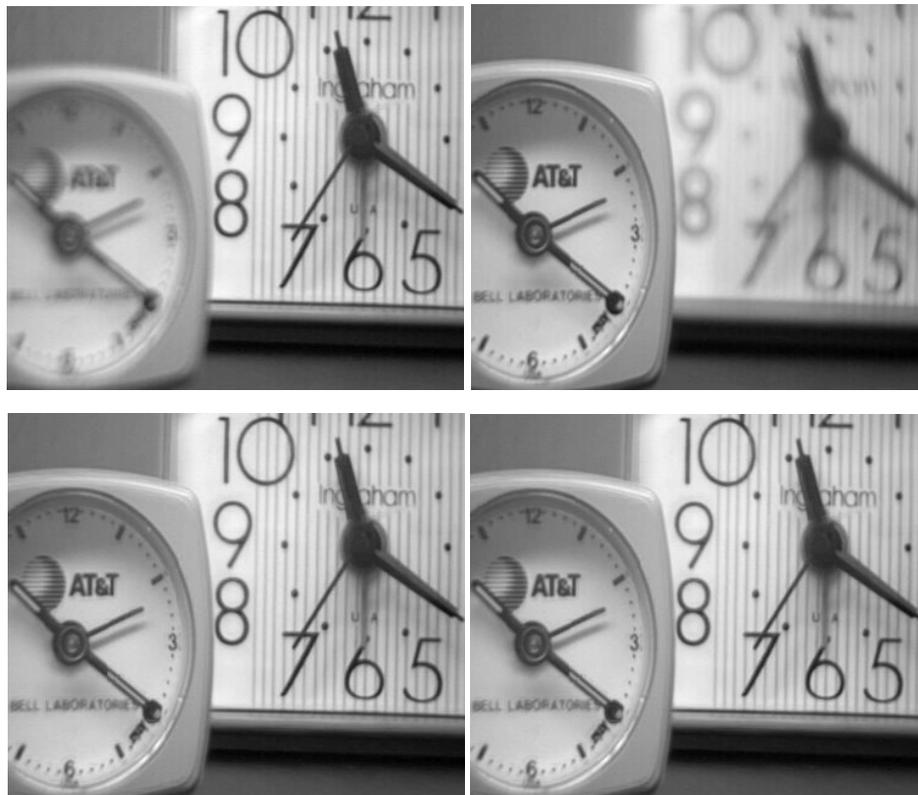


Fig.43 – Application de la fusion sur des images présentant des défauts de focalisation ; en haut : images d'origine ; en bas : image de sortie après fusion.

La figure 43 montre les deux images d'origine présentant chacune une zone floue ainsi que les deux images obtenues après 200 itérations ($dt=0.1$). La convergence du processus autorise de

considérer comme pertinent de réaliser la moyenne des deux images dans le but d'obtenir une seule image en sortie du processus.

Les résultats de notre approche se sont révélés comparables, au sens de la mesure de qualité de Piella [Pie04], aux résultats obtenus par une pyramide laplacienne [Bur83] d'une part et la Transformée en ondelettes discrètes invariants par translation (SIDTW) [Roc97] d'autre part.

Le principal intérêt de la fusion-diffusion par EDP est la possibilité de traiter le cas de sources bruitées et d'adapter l'équation de diffusion pour obtenir un filtrage anisotrope de ces sources. La figure 44 illustre le fonctionnement de notre approche sur les mêmes images corrompues par un bruit blanc gaussien (SNR = 9dB).

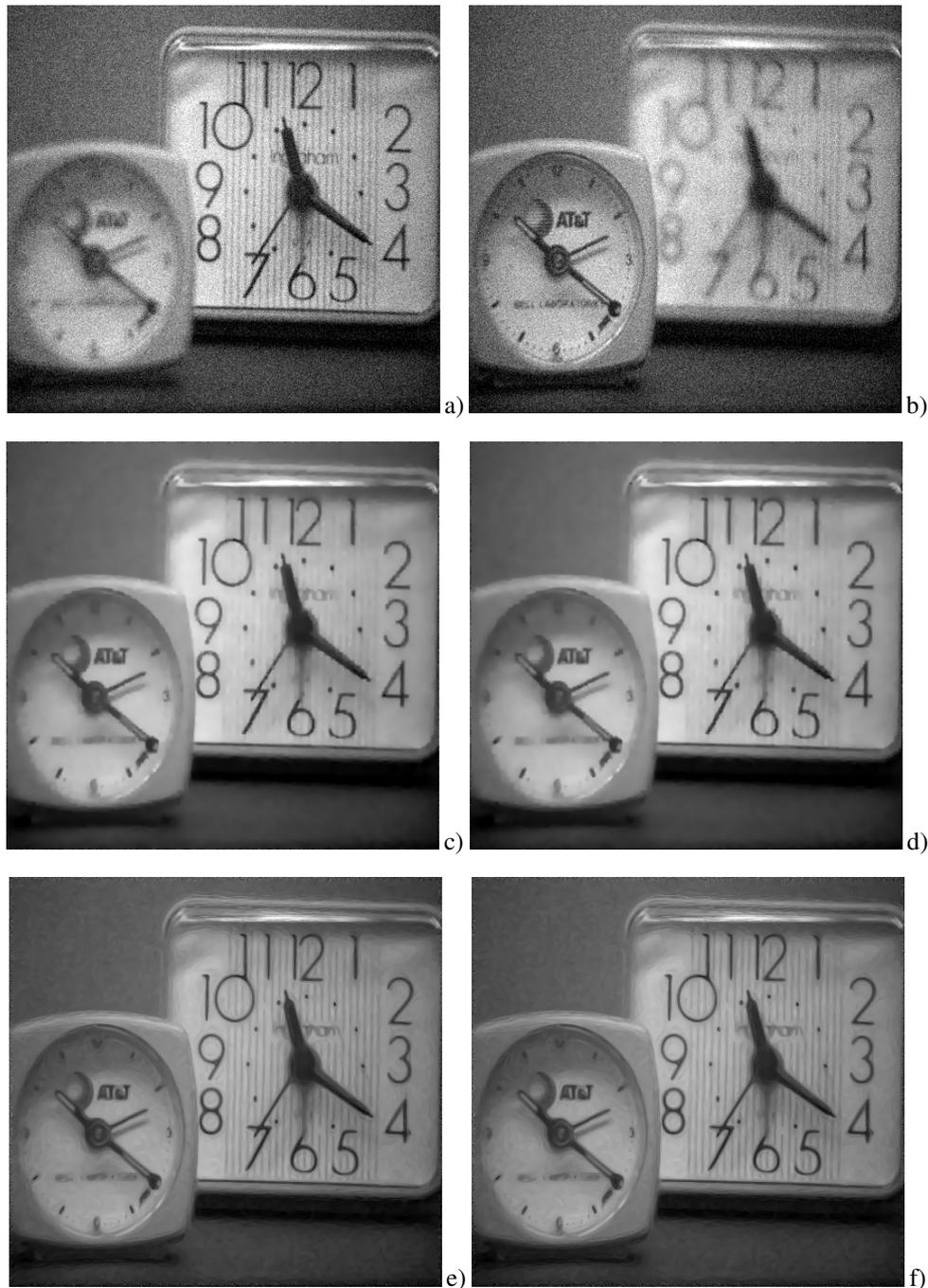


Fig.44 – Fusion sur des images bruitées présentant des défauts de focalisation ; a),b) images d'origine c), d) résultat avec le terme de diffusion de Catté et al [Cat92] ; e), f) résultat avec une diffusion 1D/2D

Nous montrons deux types de résultats qui permettent d'illustrer tout l'intérêt de la formulation par EDP.

Les premiers résultats (Fig 44c et d) sont issus d'un processus de fusion-diffusion directement inspiré de (41). Le terme de fusion est un terme de diffusion adaptative inspiré par le travail de Catté et al[Cat92]. Ce type de diffusion préserve les contours sous réserve que le niveau de bruit ne soit pas trop important ; surtout, c'est un processus extrêmement local qui ne prend pas en compte l'orientation de la structure. Par suite, la fusion est réalisée mais on note une atténuation sensible des lignes verticales dans le réveil de droite.

Le second type de résultat a été obtenu en utilisant la méthode de diffusion 1D/2D présentée au chapitre 1. Cette méthode permet à la fois de lisser de manière isotrope les zones homogènes (fond de l'image) et d'obtenir un comportement très anisotrope lorsque des structures orientées apparaissent. L'utilisation de ce terme de diffusion associé à un terme de fusion isotrope et un terme de régularisation donne des résultats présentant une préservation améliorée des structures orientées (Fig. 44e et f).

En ce qui concerne les applications sismiques, nous proposons une extension 3D dont le terme de diffusion est directement inspiré de la diffusion tensorielle SFPD (Seismic Fault Preserving Diffusion) présentée au chapitre précédent [A11].

L'équation d'évolution prend donc la forme :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = \text{div}(D_i \nabla U_i) - \beta_i \text{div}(g_F(|\nabla U|_{\max}) \nabla U_{\max}) + \gamma \text{div}(g_R(\nabla U_i, \nabla U_k^{t=0}) \nabla U_i) \quad (44)$$

La figure 45 montre les résultats de fusion sur deux blocs de synthèse fortement bruités. Le bloc de droite a été dégradé de manière à atténuer la faille, mieux perceptible dans le bloc de gauche. Le résultat sur le bloc de droite (Fig 45 d) montre la qualité du rehaussement de la faille.

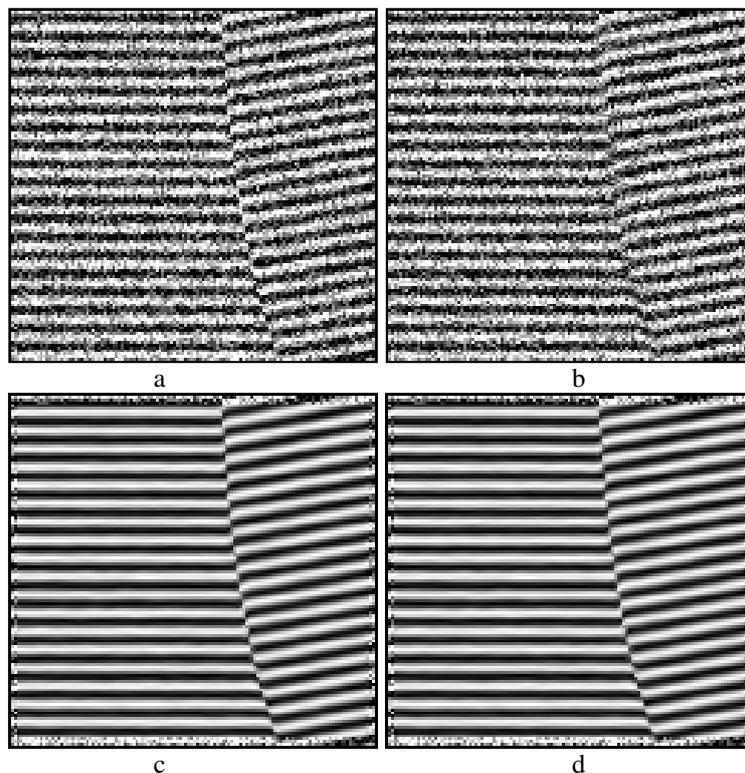


Fig.45 – Fusion de bloc ; a) bloc de synthèse bruité, b) second bloc bruité, dont la faille est atténuée c), d) résultats de la fusion – diffusion 3D

La figure 46 illustre le fonctionnement de notre approche sur des blocs réels. Les blocs traités sont fortement perturbés par du bruit structuré. Nous pouvons remarquer la disparition du bruit dans les images de sortie ainsi que le rehaussement des discontinuités, notamment dans la zone entourée au centre de l'image. De plus, la convergence des résultats en sortie est nettement perceptible.

Un détecteur de faille permet de visualiser le rehaussement, la qualité du filtrage et l'amélioration éventuelle des continuités. La figure 47 montre une vue du haut (Time-Slice) des blocs d'origine et des blocs obtenus après fusion. L'attribut de détection des failles utilisé est l'opérateur C_{fault} de Bakker et al [Bak99].

Notons que les blocs que nous présentons aux figures 46 et 47 sont des blocs actuellement en cours d'étude dans le cadre de la validation définitive de notre approche avant transfert chez notre partenaire.

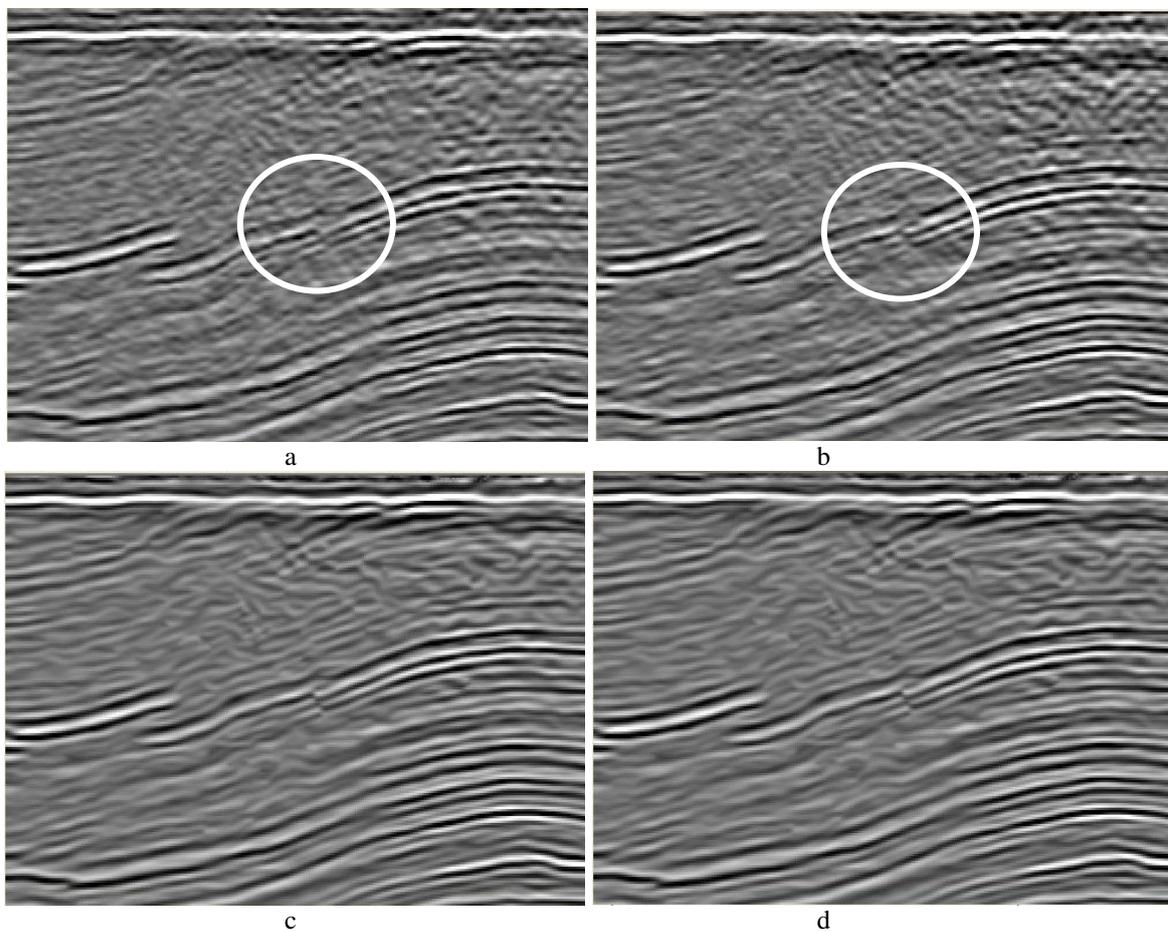


Fig.46 – Fusion de bloc ; a), b) blocs d'origine ; c), d) résultats de la fusion – diffusion 3D

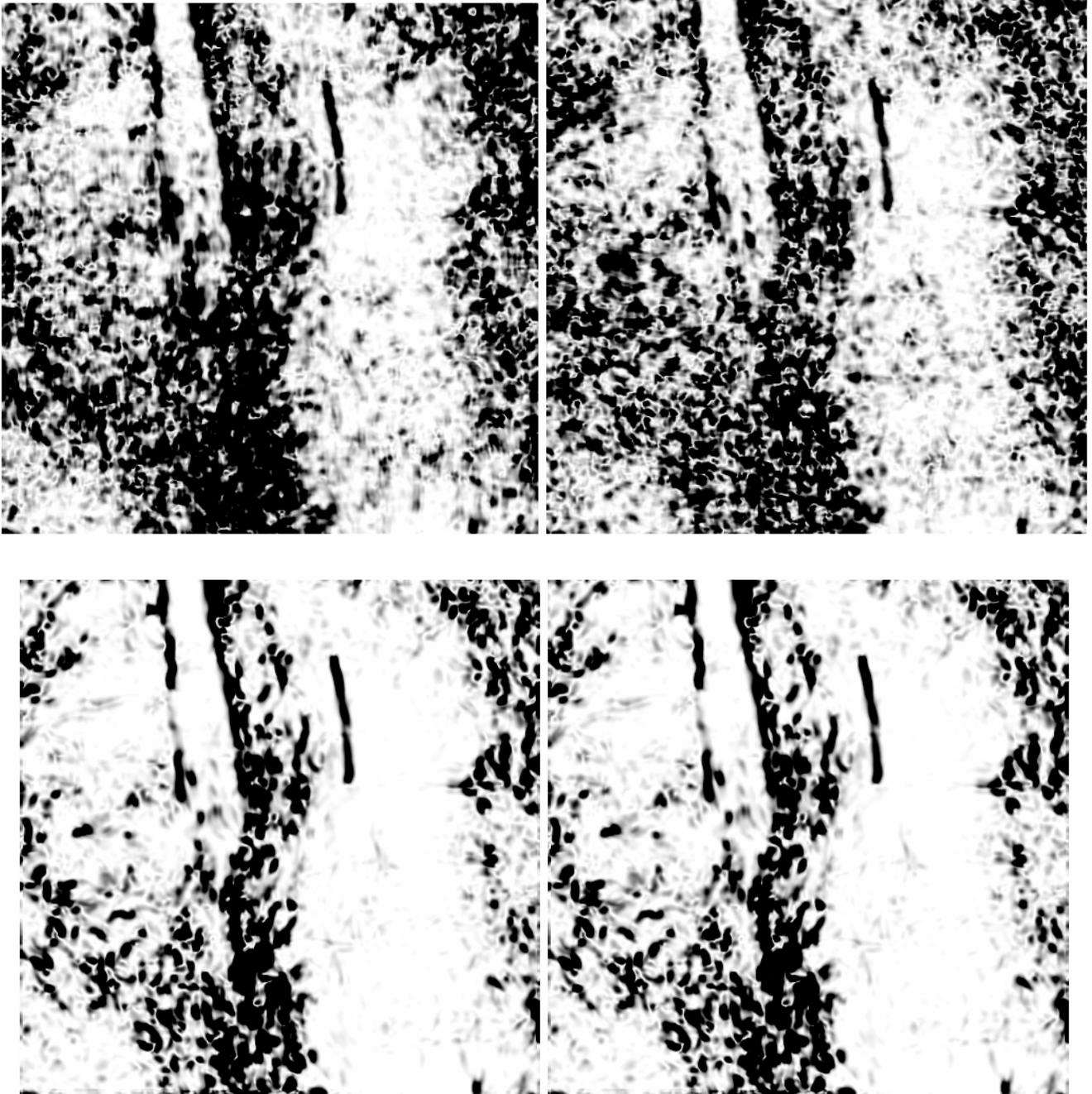


Fig.47 – détection de faille – attribut Cfault ; a), b) blocs d'origine ; c), d) résultats sur les blocs fusionnés

Conclusion et perspectives

J'ai exposé dans ce mémoire des développements et résultats relatifs à la diffusion et la fusion directionnelles fondées sur un formalisme à base d'Equations aux dérivées Partielles.

Ma dynamique actuelle et mes perspectives de recherche s'inscrivent pour partie autour de la thématique de fusion-diffusion par EDP évoquée précédemment et qui semble être en mesure de déboucher sur des résultats très importants tant au niveau académique qu'au niveau des applications industrielles potentielles. Le formalisme que nous avons proposé doit être considéré comme le cadre très général permettant de décliner toutes sortes de problématique de fusion bas niveau. De plus, il reste un certain nombre de résultats théoriques que nous devons obtenir. Parmi ceux-ci, nous devons démontrer la convergence de notre approche et exhiber les conditions de stabilité du processus.

Concernant la diffusion, nous chercherons à étendre les équations de diffusion directionnelle pour traiter le cas des orientations multiples en nous appuyant sur l'opération IRON développé au sein de notre équipe.

Parallèlement, les problématiques suscitées par nos partenaires industriels permettent d'ouvrir des perspectives sur de nouvelles thématiques de recherche : c'est le cas pour une problématique qui concerne l'amélioration des opérateurs de détection de faille et dont j'ai la charge depuis 2006. Nous proposons de développer une approche stochastique fondée sur les processus ponctuels marqués. Ces développements sont réalisés au travers de la thèse de Barna Keresztes [T5]. Par cette approche nous pensons être en mesure de proposer une véritable approche multi-échelle permettant de détecter des failles d'extension variable à partir d'un modèle d'objets paraboliques. Notons que si le modèle stochastique est développé actuellement à travers une approche multi-2D, une perspective concerne l'extension vers un modèle 3D tout à fait original.

Références bibliographiques

- [Aks06] B. Aksasse, Y. Stitou, Y. Berthoumieu, M. Najim – "Eigen filter for attenuation coherent noise in 2-D seismic data", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, ISCCSP06*, Marrakech, Morocco, 2006.
- [Alv93] L. Alvarez, F. Guichard, P. L. Lions, J.M. Morel – "Axioms and fundamental equations of image processing", *Arch. Ration. Mechan.*, vol.123, pp. 199-257, 1993.
- [Alv92] L. Alvarez, P. L. Lions, J. M. Morel – "Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion II", *SIAM J. Numer. Anal.*, vol.29, no.3, pp. 845-866, 1992.
- [Avc02] I. Avcibas, B. Sankur, K. Sayood – "Statistical evaluation of image quality measures", *Journal of Electronic Imaging*, 11(2), 206-23, 2002.
- [Bak99] P. Bakker, L.J. van Vliet, P.W. Verbeek, – "Edge preserving orientation adaptive filtering", *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – CVPR99*, vol.1, pp. 535-540, Fort Collins, CO, 1999.
- [Bak01] P. Bakker, P.W. Verbeek, L.J. Van Vliet, – "Confidence and curvature estimation of curvilinear structures in 3-D." *Proceedings of the Eighth International Conference On Computer Vision*, Vancouver, Canada, volume II, pp. 139-144, 2001.
- [Bak02] P. Bakker – "Image structure analysis for seismic interpretation" *Ph.D. thesis*, Delft University of Technology, 2002.
- [Big91] J. Bigün, G. H. Granlung, J. Wiklund – "Multidimensional orientation estimation with applications to texture analysis and optical flow", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.13, pp.775-790, no. 8, 1991.
- [Blu05] R.S. Blum, Z. Xue and Z. Zhang, "An overview of image fusion", in: R.S. Blum, Z. Liu (Eds), *Multi-Sensor Image Fusion and Its Applications*, Signal and Image Processing Series, Marcel Dekker/CRC Press, 2005.
- [Bur93] P.J. Burt and R.J. Kolczynski, "Enhanced image capture through fusion", In *Fourth International Conference on Computer Vision*, Berlin, Germany, pp. 173-182, 1993.
- [Cat92] F. Catte, P.L. Lions, J.M. Morel, T. Coll – "Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion I", *SIAM J. Numer. Anal.*, vol.29, no.1, pp. 182-193, 1992.
- [Cas98] V. Caselles, J. M. Morel, G. Sapiro, A. Tannenbaum – "Introduction to the special issue on partial differential equations and geometry driven diffusion in image processing and analysis", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.7, no.3, pp. 269-271, March, 1998.

- [Cha91] P.S.Chavez, S.C. Sides and J.A. Anderson, – "Comparison of three different methods to merge multi-resolution and multi-sectoral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(3): 295-303, 1991.
- [Cha94] P. Charbonnier, G. Aubert, L. Blanc-Ferraud, M. Barlaud – “ Two deterministic half quadratic regularization algorithms for computed imaging”, *Proceedings IEEE International Conference on Image Processing ICIP'94*, Austin, Texas, vol.2, pp.168-172.
- [Cha00] T.F. Chan, S.H. Kang, J. Shen – “Total variation denoising and enhancement of color images based on the cb and hsv color models”, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol.12, no.4, 2000.
- [Dan90] P.E . Danielsson, O. Segger – “Rotation invariance and higher order derivatives detectors”, *Computer Vision , Graphics and Image Processing*, vol.49, pp.198-221, 1990.
- [Der96] R. Deriche, O. Faugeras – “Les EDP’s en traitement d’images et vision par ordinateur “, *Traitement du Signal*, vol. 13. no.6, pp.551-578, 1996.
- [Don99] M. Donias – "Caractérisation de champs d’orientations par analyse en composantes principales et estimation de la courbure", *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux I, 1999.
- [Far97] H. Farid, E. P. Simoncelli – “Optimally rotation –equivalent directional derivative kernels”, *Proceedings of the 7th Int’l Conf. Computer Analysis of Images and Patterns, Kiel, Germany*, 1997.
- [Gar96] J. Garding, T. Lindenberg – “Direct computation of shape cues using scale-adapted spatial derivative operators”, *International Journal of Computer Vision*, vol. 17(2), pp. 163-191, 1996.
- [Ger99] A. Gersztenkorn, K. Marfurt, – “Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping", *Geophysics*, vol. 64, n°5, pp. 1468-1479, septembre-octobre 1999.
- [Gil02] G. Gilboa, N. Sochen, Y. Zeevi, – “Forward-and-backward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, n°7, pp. 689-703, 2002.
- [Gre90] P. J. Green – “Bayesian reconstruction from emission tomography data using a modified EM algorithm”, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, MI-9(1), pp.84-93, 1990.
- [Gui98] S. Guillon, P. Baylou, M. Najim, N. Keskes, – “Adaptive nonlinear filters for 2D and 3D image enhancement", *Signal Processing*, vol. 67, pp. 237-254, 1998.
- [Jah97] B. Jahne –“Performance characteristics of low –level motion estimators in spatiotemporal images”, *In: W. Forstner (Eds.), DAGM Workshop Performance Characteristics and Quality of Computer Vision Algorithms*, Braunschweig, Germany, 1997.

- [KaW87] M. Kass, A. Witkin – “Analyzing oriented patterns”, *Computer Graphics and Image Processing*, vol.37, pp. 362-385, 1987.
- [Koe84] J.J. Koenderink, – “The structure of images”, *Biological Cybernetics*, vol. 50, n°5, pp 363-370, 1984.
- [Kor96] P. Kornprobst, R. Deriche, G.Aubert – “Image restoration via PDE”, *Proceedings of the First Annual Symposium on Enabling Technologies for Law Enforcement and Security, SPIE Conf.2942: Investigative Image Processing*, Boston USA, 1996.
- [Kor97] P. Kornprobst, R. Deriche, G.Aubert – “Nonlinear operators in image restoration”, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Puerto-Rico, pp. 325-331, 1997.
- [Kor99] P. Kornprobst, R. Deriche, G.Aubert – “Image sequence analysis via partial differential equations”, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol. 11, no.1, pp.5-26, 1999.
- [Kuw76] M. Kuwahara, K. Hachimura, S. Eiho, M. Kinoshita – “Processing of RI-angiocardigraphic images”, *Digital Processing of Biomedical Images*, pp. 187-203, 1976.
- [Lep02] F. Le Pouliquen – “Opérateurs discrets pour l’estimation adaptative et optimale de l’orientation. Application a l’imagerie sismique”, *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux I, 2002.
- [Lep05] F. Le Pouliquen, JP. Da Costa, C. Germain, P. Baylou – “A new adaptive framework for unbiased orientation estimation”, *Pattern Recognition*, Vol. 38 pp. 2032-2046, Oct.2005
- [Lin93]- T. Lindenberg – “On scale selection for differential operators”, *Proceedings 8th Scandinavian Conference on Image Analysis*, Tromse , Norway, pp.857-866, 1993.
- [Luc97] L. Lucido, R. Deriche, L. Alvarez, V. Rigaud – “Sur quelques schémas numériques de résolution d’équations aux dérivées partielles pour le traitement d’images“, *Rapport de recherche INRIA-Sophia Antipolis*, no. 3192, 1997.
- [Mar72] K. V. Mardia – "*Statistics of Directional Data*", Academic Press, 1972.
- [Mar80] D. Marr, E. Hildreth – “Theory of Edge Detection”, *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Vol.207*, pp. 187-217, 1980.
- [Mon99] J. Monteil, A. Beghdadi – “A new interpretation and improvement of the nonlinear anisotropic diffusion for image enhancement”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.21, no.9, pp.940-946, 1999.
- [Mor95] J. M Morel, S. Solimini – "*Variational methods in image segmentation*", Birkhausser-Boston, 1995.
- [Nag79] M. Nagao – “Edge Preserving Smoothing”, *CGIP*, vol. 9, p.394-407, 1979.

- [Oma04] S.M. O'Malley, I.A. Kakadiaris – “Towards robust structure-based enhancement and horizon picking in 3-D seismic data”, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – CVPR04*, pp. 482-489, Washington DC, 2004.
- [Per90] P. Perona, J. Malik, – “Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, n°7, pp 629-639, 1990.
- [Per98] P. Perona – “Orientation diffusions”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.7, no.3, pp.457-467,1998.
- [Pie03] G. Piella, – “A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions”, *Information Fusion*, Vol. 9, pp. 259-280, 2003.
- [Pie04] G. Piella, – “New quality measures for image fusion”, *Int. Conference on Information Fusion*, Stockholm, Sweden, pp. 542-546, 2004.
- [Ran00] T. Randen, E. Monsen, C. Signer, A. Abrahamsen, J.O. Hansen, T. Saeter, J. Schlaf, L. Sonneland – “Three-dimensional texture attributes for seismic data analysis” *SEG International Meeting*, 2000.
- [Rao90] A. R. Rao – “*A taxonomy for texture description and identification*”, Springer Verlag, New York, 1990.
- [Rao91] A.R. Rao, B.G. Schunck – “Computing oriented texture fields”, *Graphical Models and Image Processing*, vol. 53, pp.157-185, 1991.
- [Roc97] O. Rockinger, – “Image Sequence Fusion Using a Shift-Invariant Wavelet Transform”, *International Conference on Image Processing ICIP 1997*, Washington DC, Vol. III, pp. 288-292, 1997.
- [Roc98] O. Rockinger and T. Fechner, – “Pixel-level image fusion: the case of image sequences” *Proc. SPIE*, vol. 3374, pp. 378-388, 1998.
- [Rud92] L. Rudin, S.Osher, E. Fatemi – “Nonlinear total variation based noise removal algorithms”, *Physica D*, vol. 60, pp.259-268, 1992.
- [Sap94] G. Sapiro, A. Tannenbaum – “On affine plane curve evolution”, *J. Function. Anal.*, vol.119, pp. 79-120,1994.
- [Sap00] G. Sapiro – “*Geometric partial differential equations and image analysis*”, Cambridge University Press, 2000.
- [Sch00] H. Scharr, J. Weickert, – “An anisotropic diffusion algorithm with optimized rotation invariance”, *In: G. Sommer, N. Kruger, C.Perwass (Eds.), Mustererkennung*, Springer, Berlin, pp.460-467; 2000.
- [Sib84] M. Sibony, J.Cl. Mardon – “*Approximations et équations différentielles*”, Hermann –Editeurs de Sciences et des Arts, 1984.

[Tan00] B Tang, G. Sapiro, V. Casselles – “Diffusion of general data on non-flat manifolds via harmonic maps theory: the direction diffusion case”, *International Journal of Computer Vision* , vol 36., no.2 pp.149-161, 2000.

[Van99] G.M.P. Van Kempen, N. Van den Brink, L.J. Van Vliet, M. Van Ginkel, P.W. Verbeek, H. Blonk, – "The application of a local dimensionality estimator to the analysis of 3D microscopic network structures." *Proceedings of the 11th Scandinavian Conference on Image Analysis*, Kangerlussuaq, Greenland, pp. 447-455, 1999.

[Wei94] J. Weickert – “Scale-space properties of nonlinear diffusion filtering with a diffusion tensor”, *Report No.110, Laboratory of Technomathematics, University of Kaiserslautern*, Oct., 1994.

[Wei95] J. Weickert – ”Multiscale texture enhancement”, *In: Hlavac V., Sara R.(Eds.) Computer analysis of images and patterns*, Springer, Berlin, pp.230-237, 1995.

[Wei97] J. Weickert – “Coherence enhancing diffusion of colour images”, *Proceedings of the VII National Symposium on Pattern Recognition and Image Analysis, NSPRIA*, Barcelona, vol.1, pp239-244, 1997.

[Wei98] J. Weickert – “Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.7, no.3, pp. 398-410, 1998.

[Wei99] J. Weickert – “Coherence enhancing diffusion”, *International Journal of Computer Vision* , no.31, pp. 111-127, 1999.

[Whi93] R. Whitaker – "Geometry limited diffusion", *Ph.D. Dissertation*, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1993.

[Wit83] A. Witkin – “Scale –space filtering”, *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, New-York, pp. 1019-1021, 1983.

[Yez98] A. Yezzi – “Modified curvature motion for image smoothing and enhancement”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.7, no.3, pp.345-352, 1998.

Liste des travaux et publications

Articles dans des périodiques à comité de lecture (parus ou sous presse)

- A1. **Lavialle O.**, Qannari E.M., Vidal C., "Agrégation d'ordres sous contrainte : classement de produits à partir de données sensorielles". *Revue de Statistique Appliquée* XXXVIII(4), pp 61-73, 1990.
- A2. **Lavialle O.**, "Recherche d'un quasi-ordre médian à partir d'un profil de relation floues", *RAIRO/Operations Research*, Vol 31, n°3, pp 311-330, 1997
- A3. **Lavialle O.**, Angella F., P. Baylou P., "Deformable Particule Systems", *Image Anal & Stereol* Vol 20 suppl n°1 pp 269-274, 2001.
- A4. Terebes R., **Lavialle O.**, Borda M. , Nafornta I . "Gradient based curvature estimation", *Image Analysis and Stereology*, Vol.20, suppl.1, pp.287-292, 2001.
- A5. Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., Borda M. "Orientation driven diffusion" *Acta Technica Napocensis-Electronics and Telecommunications*, Vol 42, n°2 pp 20-24, 2002
- A6. **Lavialle O.**, Angella F., Germain C., Baylou P., "Dynamic Particle Systems for Object Structure Extraction", *Image Analysis and Stereology*, Vol 22, n°1, pp 35-42, 2003
- A7. Melchior P., Orsoni B., **Lavialle O.**, Poty A., Oustaloup A., "Consideration of obstacle danger level in path planning using A* and Fast-Marching optimisation: comparative study" *Signal Processing*, Vol. 83, Issue 11, pp 2387-2396, 2003
- A8. Germain C., Da Costa J.P., **Lavialle O.**, Baylou P., "Multiscale estimation of vector field anisotropy application to texture characterization" *Signal Processing*, Vol. 83, Issue 7, pp 1487-1503, 2003.
- A9. Germain Ch., Blanc R., Donias M., **Lavialle O.**, Da Costa J.P. et Baylou P., " Estimating the section elevation angle of cubes on a cubic mesh. Application to nickel microstructure size estimation", *Image Analysis and Stereology*, Vol 24, n°3, 2005.
- A10. Terebes R., **Lavialle O.**, Borda M., et Baylou P., "Flow Coherence Diffusion. Linear and Non-Linear Case", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol 3708, pp.316-323, 2005.
- A11. **Lavialle O.**, Pop S., Germain C., Donias M., Guillon S., Keskes N., Berthoumieu Y. "Seismic Fault Preserving Diffusion", *Journal of Applied Geophysics*, Volume 61, Issue 2, pp 132-141, 2007
- A12. Da Costa J.P., Michelet F., Germain Ch., **Lavialle O.**, Grenier G., "Delineation of Vine Parcels by Segmentation of High Resolution Remote Sensed Images", *Precision Agriculture*, Vol. 8, n° 1-2, pp. 95-110, Avr. 2007.
- A13. Michelet F, Da Costa, J.P., **Lavialle O.**, Berthoumieu Y., Baylou P., Germain Ch., "Estimating Local Multiple Orientations", *Signal Processing*, Vol. 87, pp. 1655–1669, Juil. 2007.
- A14. Pop S., **Lavialle O.**, Terebes R. Borda M., "A New Partial Differential Equation-based approach for 3D data denoising and edge preserving" *Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg.*, Vol 52, n°3, Juil. 2007

- A15. Donias M., David C., **Lavialle O.**, Berthoumieu Y., Guillon S., Keskes N. "New Fault Attribut Based on a Robust Directional Scheme" Geophysics, accepté pour publication
- A16. Pop S., **Lavialle O.**, Terebes R. Borda M., "A PDE-Based approach for image fusion" Lecture Notes in Computer Science, accepté pour publication, 2007.

Articles dans des périodiques à comité de lecture (Soumis ou en révision favorable)

- A17. Da Costa J.P., Germain Ch., **Lavialle O.**, Grenier G., "A New Framework for the Segmentation and Characterisation of Row Crops, Application To Vineyard Monitoring", soumis à Computer & Electronics in Agriculture.
- A18. Homayouni S., Da Costa J.P., **Lavialle O.**, Germain C., Grenier G., "Sub Pixel Target Detection using Independent Component Analysis. Application: GCPs detection in hyperspectral image." soumis à IEEE Geosciences and Remote Sensing Letter.

Articles dans des périodiques à comité de lecture (autres domaines)

[cf développement et soutien à la recherche / document de synthèse]

- A19. Roudeillac P., Faedi W., **Lavialle O.**, "A Multicriteria Decision Aid to Determine the Genetic Performance of Strawberry through a Varietal Observatory Network in Western Europe", Acta Horticulturae, n°439, Vol 1, pp 307-317, 1997
- A20. Wolff R.L., **Lavialle O.**, Pédrone F., Pasquier E., Deluc L.G, Marpeau A.M., Aitzetmüller K. "Fatty acid composition of Pinaceae as taxonomic markers" Lipids 36 439-451, 2001.
- A21. Wolff R.L., **Lavialle O.**, Pédrone F., Pasquier E., Destailats F., Marpeau A.M., Angers P., Aitzetmüller K., "Abietoid seed fatty acid compositions. A review of the genera Abies, Cedrus, Hesperopeuce, Keteleeria, Pseudolarix, and Tsuga, and preliminary inferences on the taxonomy of Pinaceae." Lipids. 37(1):17-26, 2002.
- A22. Bennetau-Pelissero C., Arnal-Schnebelen B., Lamothe V., Sauvans P., Sagne J.L., Verbruggen M.A., Mathey J., **Lavialle O.**, "ELISA as a new method to measure genistein and daidzein in food and human fluids" Food Chemistry, Volume 82, Issue 4, pp 645-658, 2003
- A23. Pereira G, Hilbert G, Gaudillere J.-P., Soyer J.-P., Van Leeuwen C., **Lavialle O.**, Moing A., Deborde C., Maucourt M. and Rolin D., "1H NMR metabolic fingerprints of grape berries produced in different plots in Bordeaux-France." Acta Horticulturae, n°689, pp 257-263, 2004.
- A24. Vaysse P., Reynier P., Roche L., **Lavialle O.**, "Sensory Evaluation of New Pear Cultivars", Acta Horticulturae, vol 671, n°3, 2005.
- A25. Pereira G, Gaudillere J.-P., Van Leeuwen C., Hilbert G, **Lavialle O.**, Maucourt M., Deborde C., Moing A. and Rolin D., "1H NMR and Chemometrics to characterize mature grape berries in four winegrowing areas in Bordeaux-France." J. Agric. Food Chem. 53, n°16, 6382-6389, 2005.

Articles dans des revues techniques nationales

[cf développement et soutien à la recherche / document de synthèse]

- A26. Zinck I., Lavalie O., Roudeillac P. "Des fraises de France...mais pour quels terroirs ? Application d'une méthode d'analyse multicritère originale à un réseau national d'évaluation", Arboriculture Fruitière, 1999.
- A27. Chéry P., Lavalie O., Bourennane H., King D., Bruand A. "Variabilité de Constitution Granulométrique des Limons de Petite Beauce", Etude et Gestion des Sols, 1999

Communications à des manifestations internationales à comité de lecture avec actes

Communications dans la communauté scientifique de l'analyse d'image

- C1. Roux R. , **Lavalie O.**, Germain C., Grenier G., "Early yield sensing of wheat with picture analysis" Actes du colloque IARP (International Advanced Robotics Program), pp 83 – 92, Toulouse, Oct. 1995
- C2. Martinez de Guereu C., Germain C., **Lavalie O.**, Grenier G., "Designing an automatic counting system for wheatears", AGENG'96 (International Conference on Agricultural Engineering), 9 p. Madrid – Sept. 1996
- C3. **Lavalie O.**, Germain C., Grenier G., "Textural approach to estimate the size of clods on seed bed", Biorobotics'97, Valencia, pp 183-188. Mai 1997
- C4. Germain C., **Lavalie O.**, Grenier G., " New picture analysis methods for granulometry estimation. Application to the caracterisation of seed bed quality", AGENG'98, Oslo, Août 1998.
- C5. **Lavalie O.**, Baylou P. "Electrostatic formulation for adaptative dilation" Proceedings EUSIPCO'98 (European Signal Processing Conference), Ile de Rhodes (Grèce), Vol III pp 1669-1673, Sept. 1998
- C6. Angella F., **Lavalie O.**, Baylou P. "Hierarchical skeleton extraction based on a deformable particle system" Proceedings EUSIPCO'98 (European Signal Processing Conference), Ile de Rhodes (Grèce), Vol II, pp 181-185, Sept. 98
- C7. Angella F., **Lavalie O.**, Baylou P. "A deformable and expansible tree for structure recovery" proceeding ICIP 98 (IEEE International Conference on Image Processing), Chicago, Vol 1 pp 241-245, Oct. 98
- C8. **Lavalie O.**, Angella F., Baylou P. "An extension of the minimal path for structure recovery " ICIP 99 (IEEE International Conference on Image Processing), Kobe (Japon), Vol 4, pp405-409, Oct. 1999
- C9. Terebes R., **Lavalie O.**, Baylou P., " Adaptive directional morphological operators " EUSIPCO-2000, Tampere, Finland, 4pages, Sept. 2000
- C10. **Lavalie O.**, Delord D., Baylou P. " Adaptive morphology applied to grey level object transformation " EUSIPCO 2000 , Tampere, Finland, 4pages, Sept. 2000
- C11. Da Costa J.P., Germain C., **Lavalie O.**, Baylou P., " Bias introduced by Mean Orientation Estimation Methods " EUSIPCO-2000, Tampere, Finland, 4pages, Sept. 2000

- C12. **Lavialle O.**, Molines X., Angella F., Baylou P., "Active Contours Network to Straighten Distorted text lines", IEEE ICIP 2001, Thessaloniki, Greece, Vol. 1 pp 748-751, Oct. 2001.
- C13. Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., Borda M., "Normal field based curvature estimation", IEEE International Conference in Telecommunications ICT 2001, Bucharest, Romania, Sept 2001.
- C14. Melchior P., Orsoni B., **Lavialle O.**, Oustaloup A. "The CRONE toolbox for Matlab: Fractional Path Planning Design in Robotics", IEEE Intern. Workshop on Robot and human communication, 10, pp 534-540, May 2002
- C15. Terebes R., **Lavialle O.**, Borda M., I. Naornita "Adaptive filtering using morphological operators and genetic algorithms ", In Proceedings of the 6'th International Conference on Signal Processing, vol.1, pp.853-858, Beijing, China, Juillet 2002.
- C16. Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., Borda M. – "Anisotropic diffusion of strongly oriented patterns", In Proceedings of the IEEE International Workshop " Trends and Recent Achievements in Information Technology, pp.102-108, Cluj-Napoca, Romania, Sept. 2002.
- C17. Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., Borda M. "Mixed Anisotropic Diffusion" International Conference in Pattern Recognition, ICPR 2002, Quebec, Canada, Août, 2002.
- C18. Dargent R., **Lavialle O.**, B. Orsoni, Baylou P., P. Melchior, "Fast marching and Traveltime images : 8-neighbourhood approach", EUSIPCO 2002, Toulouse, Sept. 2002.
- C19. Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., Borda M., "Directional Anisotropic Diffusion», EUSIPCO 2002, Toulouse, Sept. 2002.
- C20. Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., Borda M., " Flow Coherence Diffusion ", Third International Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, , Barcelona, Sept. 2003.
- C21. Bobillet W., Da Costa J.P., G.Germain, **Lavialle O.**, G. Grenier, "Row detection in high resolution remote sensing images of vine fields", European Conference on Precision Agriculture, Berlin, Juin 2003.
- C22. Minvielle P., **Lavialle O.**, Moser S., "Ballistic Tracking Techniques, Decades of Improvements " 1st AAAF International Conference on Missile Defence, Arcachon Fév. 2003.
- C23. Terebes R., **Lavialle O.**, Borda M., Baylou P., Tihamer A., " Adaptive Smoothing Using Anisotropic Diffusion And Median Filter Based Diffusivities ", 4th Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration, Miskolc, Hungary, Mai 2003.
- C24. Da Costa J.P., Germain C., **Lavialle O.**, Grenier G., "Segmentation of high resolution remote sensing images: application to automatic delineation of vine fields.", Agricultural Engineering (AgEng 2004), Leuven, Belgium. Sept. 2004
- C25. Da Costa J.P., Germain C., **Lavialle O.**, Grenier G., "Automatic Delineation of Vine Fields by Segmentation of High Resolution Remote Sensing Images", accepté à International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, USA, Juillet 2004.

- C26. Dargent R., Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., "3D - tangential Diffusion", EUSIPCO 2004, Vienne, Autriche, Sept. 2004.
- C27. Dargent R., **Lavialle O.**, Guillon S., Baylou P., "Sector-based Diffusion Filtering", IEEE ICPR 2004, Cambridge, UK, Août 2004.
- C28. Terebes R., Borda M., Baozong Y., **Lavialle O.**, Baylou P., "A new PDE based approach for image restoration and enhancement using robust diffusion directions and directional derivatives based diffusivities", International Conference on Signal Processing, ICSP'04, Beijing, Chine, Oct 2004.
- C29. Terebes R., **Lavialle O.**, Borda M. , Baylou P., "2D Flow Coherence Diffusion", ACIVS 2005, Anvers, Belgique, Août 2005
- C30. S. Pop, Terebes R., Borda M. , **Lavialle O.**, Baylou P., " 3D Directional Diffusion" IEEE Region 8 EUROCON Conf., Belgrade, Juillet 2005.
- C31. Michelet F., Da Costa J.P., Germain C., **Lavialle O.**, Grenier G., "Delineation of Vine Fields by Segmentation of High Resolution Remote Sensed Images" In Proc. of the European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Suède, Juin 2005.
- C32. Terebes R., Borda M., **Lavialle O.**, Baylou P., Pop S., Adam T., "Linear Flow Coherence Diffusion", International Carpathian Control Conference, Miskolc-Lillafüred, Hongrie, Oct 2005.
- C33. Vaysse P., Grenier G., **Lavialle O.**, Henry G., Khay-Ibbat S., Germain C. et Da Costa J.P. "Image processing as a tool for quality assessment of fruits in bulk shipping bins.", Fructic'05, Montpellier, France, Juillet 2005.
- C34. **Lavialle O.**, Pop S., Dargent R., "A tensor based diffusion process to enhance faults in seismic blocks" IEEE International Symposium on Communication, Control and Signal Processing, Marrakech, Mars 2006.
- C35. Da Costa J.P., Germain C., **Lavialle O.**, Homayouni S., Grenier G., "Vine field monitoring using high resolution remote sensing images: segmentation and characterisation of rows of vines." VIth International terroir Congress, Bordeaux. Juillet 2006
- C36. Keresztes B., Borda M., Terebes R., Vaysse P., Da Costa J.P., Germain C., Grenier G., **Lavialle O.** "Object based image segmentation: Application to fruit detection in shipping bins." conférence COMM 2006, Bucharest, Roumanie, juillet 2006
- C37. Homayouni S., Da Costa J.P., Germain C., **Lavialle O.**, Grenier G., "Partial unmixing of multi or hyperspectral images using ICA and fuzzy clustering techniques: Application to vegetation mapping on vineyards" Atlantic Europe Conference on Remote Imaging and Spectroscopy (AECRIS 2006), Preston (UK), Sept 2006.
- C38. Pop S., **Lavialle O.**, Terebes R. Borda M., "Pixel Level Fusion: A PDE-Based Approach" IEEE International Symposium on Signal, Circuits and System, ISSCS'07, Iasi, Roumanie, Juillet 2007.
- C39. Pop S., **Lavialle O.**, Terebes R. Borda M., "Low-Level Fusion: A PDE-Based Approach" IEEE Fusion'07, Québec, Canada, Juillet 2007.
- C40. Pop S., Terebes R., Borda M., Guillon S., Keskes N., Baylou P., **Lavialle O.**, "3D Seismic data fusion and filtering using a PDE-based approach" IEEE ICIP'07, San Antonio, USA, Sept. 2007.

Communications (autres communautés scientifiques, Soutien à la recherche)

[cf développement et soutien à la recherche / document de synthèse]

- C41. **Lavialle O.**, "Construction de l'ordre à distance minimum d'un ensemble de crédibilités". 33èmes journées du Groupe Européen d'Aide à la Décision Multicritère, Prague - mars 1991
- C42. **Lavialle O.**, Vidal C., "algorithmes d'obtention d'ordres à distance minimum d'un ensemble de graphes de surclassement". Journées Franco-Québécoises de combinatoire, Bordeaux, Mai 1991.
- C43. **Lavialle O.**, "Recherche d'un quasi-ordre à éloignement faible d'un profil de relations binaires quelconques". 36èmes journées Groupe Européen d'Aide à la Décision Multicritère, Luxembourg – Oct. 1992
- C44. **Lavialle O.**, P. Roudeillac., "Aide à la sélection variétale multicritère", 43èmes journées Groupe Européen d'Aide à la Décision Multicritère , pp 37-46 Brest, Mars 1996.
- C45. Roudeillac P., Faedi W., **Lavialle O.**, "Setting up of a varietal observatory network in Western Europa to estimate the genetic performance of new released cultivars", 3rd ISS, Veldhoven (Pays-Bas) - Mai 1996
- C46. **Lavialle O.** [1996], "A Multicriteria Decision Aid to Rank Food Products", proceedings of the 3rd Sensometrics meeting, pp 44.1-44.3, Nantes Juin 96
- C47. Slak M.F., **Lavialle O.** "Development of the structure of land use and cover consequence for agriculture", UN-ECE Conference of European Statistician, n°14 Genève - Juillet 1997.
- C48. Vaysse P., Reynier P., Roche L., **Lavialle O.**, " Sensory evaluation of new pear varieties " 9th international pear symposium – Stellenbosch, Afrique du Sud, Oct. 2004

Communications à des manifestations nationales à comité de lecture avec actes (Communauté scientifique de l'analyse d'image)

- C49. **Lavialle O.**, Baylou P. "Morphologie Adaptative d'Inspiration Coulombienne" RFIA'98 (Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle), Vol 1, pp 209 – 216 - Clermont-Ferrand, Janvier 1998
- C50. **Lavialle O.**, Angella F., Baylou P., "Approche min-max pour la recherche d'un chemin optimal " accepté au GRETSI 99 (Conférence Française sur le traitement du signal et des images), Vannes, sept. 1999
- C51. Terebes R., **Lavialle O.**, Baylou P., Borda M., " Erosion adaptative pour les images en niveaux de gris" GRETSI'01, Toulouse, Sept 2001
- C52. **Lavialle O.**, Molines X., Angella F., Baylou P. "Réseau de contours actif et systèmes particuliers ; application au redressement de textes incurvés " GRETSI'01, Toulouse, Sept 2001.

- C53. **Lavialle O.**, Terebes R., Germain C., JP. Da Costa, Grenier G., "Diffusion orientée pour le filtrage d'images : application à l'amélioration d'images aériennes de parcelles de vignes ", GRETSI '03, 4p, Paris, Sept 2003.
- C54. Bobillet W., Da Costa J.P., Germain C., **Lavialle O.**, Grenier G., "Contours actifs : application à la détection de rangs de cultures en télédétection haute résolution" GRETSI'03, 4p., Paris, Sept 2003.

Communications à des manifestations nationales à comité de lecture avec actes
(Autres Communautés scientifiques)

- C55. **Lavialle O.**, Qannari E.M., Vidal C., "Classement de produits alimentaires à partir d'une évaluation hédonique multicritère", journées "Biométrie". Tours -mai 1990.
- C56. **Lavialle O.**, Qannari E.M., Vidal C., "Méthodes d'aide à la décision multicritère : application à l'évaluation hédoniques de produits alimentaires" Premières Journées "Agro-industries et méthodes statistiques", pp 283-294, Angers -juin 1990.
- C57. **Lavialle O.**, "Généralisation de l'algorithme Smith and Payne. Recherche d'un ordre partiel minimal à partir d'un profil de relations quelconques". Colloque "Mathématiques, Informatiques et Sciences humaines", Amiens - juin 1992.
- C58. **Lavialle O.**, "Quelques solutions heuristiques et un algorithme exact pour la recherche d'un quasi-ordre médian". Reunion "Mathématiques, Informatiques et Sciences humaines", Brest - juin 1993

Conférences sans comité de lecture – Réunions formelles – Conférences invitées

- C59 **Lavialle O.**, " Proposition of a multicriteria decision aid method to solve the problem of ordering strawberry varieties ". Colloque "Selection Variétale des Fraisiers" - Paestum (Italie) - Mars 1995
- C60 **Lavialle O.** : "Analysis of the european variety network on strawberries : two years of results ". *Exposé Expert invité*, Réunion COST n°836 - Bruxelles (DGXII) - Avril 1998.
- C61 **Lavialle O.**, " Application d'une méthode d'Aide à la décision Multicritère dans le cadre d'un réseau d'observation variétale" *Exposé invité*, CTPS - Décembre 2000.
- C62 **Lavialle O.**, Terebes R., Dargent R., Pop S., Baylou P., " Directional Anisotropique Diffusion" Exposé Réunion PIMHAI, Bordeaux- Mai 2005.
- C63 **Lavialle O.**, Vaysse P. Keresztes B., Grenier G, "Pixfel : un outil pour l'Agréage qualitatif des lots de pomme en palox" Exposé Journée Nationale Pommes, Bergerac, Novembre 2006.

Edition d'actes

- E1. C. Germain, E. Grivel, **Lavialle O.** [2000], "Friendly Exchanging Through the Net", actes du workshop du COST 254 «Intelligent Processing and Facilities for Communications Terminals Workshop» 23-24 Mars 2000.

Mémoires diplômants

- D1 **Lavialle O.** "Construction et analyse des distances entre des jugements sensoriels multicritères". Mémoire de DEA "Sciences des aliments" – Université Bordeaux I ; mention Bien, Sept. 1990.
- D2. **Lavialle O.**, "Décision Sensorielle Multicritère : classement de produits alimentaires soumis à des jugements hédoniques multicritères" ; Thèse d'informatique – Ecole Doctorale de Mathématique - Université de Bordeaux I. ; JURY : B. Roy (Professeur-Université Paris-Dauphine) Président, J.P. Barthélémy (Professeur-ENST Bretagne) rapporteur, G. Bordes (Professeur - Université Bordeaux II) rapporteur, D Gouyou-beauchamps (Professeur - Université Paris Sud) rapporteur, R. Cori (Professeur – université Bordeaux I), M. Delest (Professeur – université Bordeaux I), C. Duby ((Professeur – Institut National Agronomique Paris Grignon), C. Vidal (Sous-Directeur – SCEES Paris), Sept. 1994

Rapports à diffusion restreinte

- R1 **Lavialle O.**, Vidal C., "Median order of a set of binary relations : application to multicriteria psycho-sensorial judgments". Rapport interne LABRI n°90-96, 1991
- R2 **Lavialle O.** "Contribution à la prévision de récolte " Rapport CTIFL-Station de Creysse, 41p, 1993.
- R3 **Lavialle O.** "Estimation rapide de l'humidité des noix" Rapport CTIFL-Station de Creysse, 11p, 1994.
- R4 **Lavialle O.** "European Network for Strawberry Cultivar Evaluation , 1995-1996" Rapport d'analyse pour le Groupe Europeen de Sélection Variétale Fraise – Action Concertée AIR, 83 p., 1996
- R5 Germain C., **Lavialle O.**, Grenier G."Estimation de la densité d'épis de blé par analyse d'images" Rapport de fin de contrat Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 32 p, 1997.
- R6 **Lavialle O.** "European Network for Strawberry Cultivar Evaluation , 1996-1997" Rapport d'analyse pour le Groupe Europeen de Sélection Variétale Fraise – Action Concertée AIR, 92 p, 1997.
- R7 **Lavialle O.** "Modélisation de la sensibilité à un fongicide et estimation des effets de résistance induits " Rapport d'étude – ENITA-BIORIZON, 18 p, 1998.
- R8 **Lavialle O.** "Modélisation de données surdispersées" Rapport d'étude – ENITA-BIORIZON, 7 p, 1998.
- R9 **Lavialle O.**, C. Germain, G. Grenier "Caractérisation de la qualité du lit de semence" Rapport de fin de contrat Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 30 p, 1999

- R10 **Lavialle O.**, " Analyse des données sensorielles : Comparaison hédonique de variétés et sélections " Rapport d'étude – ENITA-CIREF, 26 p, 2002
- R11 **Lavialle O.** "Modélisation de la réponse de la concentration plasmatique en méthionine (exprimée en Aire sous la Courbe) à une supplémentation en méthionine au niveau de l'intestin chez la Vache." Rapport d'étude – ENITA-Adisseo (Commentry), 6 p, 2003
- R12 LASIS, Rapport d'avancement 2003
- R13 LASIS, Rapport d'avancement 2004
- R14 LASIS, Rapport d'avancement 2005
- R15 LASIS, Rapport d'avancement 2006

Ouvrages Techniques

[cf développement et soutien à la recherche / document de synthèse]

- OT1 Vaysse P., Reynier P., Jourdain J.M., **Lavialle O.** "Prévision de récolte", collection Hortipratic, Ed. CTIFL, 54 p, 1996

Logiciels

[cf développement et soutien à la recherche / document de synthèse]

- L1 LOSANGE (Logiciel d'ANalyse et de Gestion d'Expérimentation) – Production ENITA – CTIFL, 1992.
- L2 Ageron T., Berny F., Desecures JP, **Lavialle O.**, Lequenne D., Lopez C., Rivière R., Thomas JM., Tomassone R., Vidal C. : VIDEOSTAT, didacticiel de statistiques – Production ACTA, 1993
- L3 P. Vaysse, **Lavialle O.**, PREVAQUI ®, Logiciel de prévision de récolte – Production CTIFL, 1997
- L4 **Lavialle O.**, F. Priam : TAMARIS ®, Logiciel en ligne de calcul de puissance des essais expérimentaux (<http://www.fruits-et-legumes.net>), Production : CTIFL, 2002
- L5 **Lavialle O.**, P. Vaysse : Sensifel ® Aide à la mise en place de contrôle réception pour les lots de fruits en départ station (Version en ligne disponible fin 2007 sur <http://www.fruits-et-legumes.net>), Production : CTIFL, 2003
- L6 **Lavialle O.**, Hilaire C., Vaysse P., Desobry JM : Tastifel ® Logiciel de prédiction de la qualité gustative des lots de pêches, Production : CTIFL, 2007

Encadrement de la recherche

Thèses de doctorat soutenues

- T1. Angella F., (Allocataire MENRT), "Caractérisation de structures arborescentes à l'aide de systèmes particuliers déformables", Thèse de Doctorat "Sciences Physiques pour l'Ingénieur" – Université de Bordeaux I. Encadrement P. Baylou (50%), **Lavialle O.** (50%) – thèse soutenue le 9 Janvier 2001. Jury : L. Cohen (Directeur de Recherche, CEREMADE – Paris XI), P. Refregier (Professeur, Institut Fresnel, Marseille), JM. Chassery (Directeur de Recherche CNRS-INPG Grenoble), P. Baylou (Professeur, ENSEIRB), M. Najim (Professeur, ENSEIRB), N. Keskes (Ingénieur de Recherche – Groupe Total), **Lavialle O.** (MdC, ENITA de Bordeaux)
- T2. Terebes R. (Thèse en cotutelle Université de Cluj-Napoca (Roumanie)-Université de Bordeaux I) " Diffusion Directionnelle. Application à la restauration et à l'amélioration d'images de documents anciens " Encadrement P. Baylou (25%), M. Borda (25 %), **Lavialle O.** (50 %) – soutenue le 28 Mai 2004. Jury : A. Mateescu (Professeur, Univ. Bucharest), P. Bolon (Professeur, Univ. Savoie), I. Nafornta (Professeur Univ. Timisoara), P. Baylou (Professeur, ENSEIRB), A. Vlaicu (Vice Recteur, Univ. Cluj-Napoca), M. Borda (Professeur, Univ. Cluj-Napoca), **Lavialle O.** (MdC, ENITA de Bordeaux)
- T3. Dargent R.(Thèse Université de Bordeaux I – Financement société TOTAL) : "Diffusion Directionnelle pour le filtrage des blocs sismiques" Encadrement P. Baylou (50%), **Lavialle O.** (50 %) – soutenue le 11 juillet 2006. Jury : JC. Pesquet (Professeur, Univ. Marne la vallée), S. Roques (Directeur de Recherche CNRS, Obs. Midi-Pyrénées), P. Baylou (Professeur, ENSEIRB), M. Najim (Professeur, ENSEIRB), S. Guillon (Ingénieur de Recherche – Groupe Total), **Lavialle O.** (MdC, ENITA de Bordeaux)

Thèses de doctorat en cours

- T4. Pop S. (Thèse en cotutelle Université de Cluj-Napoca (Roumanie)-Université de Bordeaux I) "Diffusion et fusion de données sismiques par EDP" Encadrement P. Baylou (25%), M. Borda (25 %), **Lavialle O.** (50 %) – début de thèse : Octobre 2004, Lauréat d'une Bourse d'Excellence EGIDE – EIFFEL pour l'année 2006-2007.
- T5. Keresztes B. (Thèse en cotutelle Université de Cluj-Napoca (Roumanie)-Université de Bordeaux I) "Processus de points marqués pour la segmentation des failles sismiques" Encadrement P. Baylou (25%), M. Borda (25 %), **Lavialle O.** (50 %) – début de thèse : Octobre 2005.

Post Doctorant

- P1. Homayouni S., "Télé-détection Multi et Hyperspectrale, classification" ; cofinancement PIMHAI (Projet Intereg IIIB) – ENITA de Bordeaux (Contrat d'Avenir Scientifique) 2005-2007

Mémoires de Master Recherche et DEA.

- M1. Roux R., "Caractérisation de texture appliquée à la segmentation de petits objets : application au dénombrement d'épi de blé" DEA APSI, 1996
- M2. D. Delord [1999] "Morphologie Adaptative d'inspiration Coulombienne : dilatation directionnelle pour les images en niveaux de gris" mémoire de DEA APSI, 1999.
- M3. X. Molines "Redressement de lignes de texte par réseau de contours actifs" mémoire de DEA APSI, 2000.
- M4. A. Marques Da Silva "Diffusion anisotropique d'une image d'orientation" mémoire de DEA, APSI, 2000.
- M5 F. Robin "Détection de failles sismiques par la méthode Fast-Marching" mémoire de DEA, APSI, 2001.
- M6. C. Beliard "Apport des méthodes Random Walk pour la restauration d'images" mémoire de DEA, APSI, 2002
- M7 S. Moser "Sequential Monte Carlo methods for target tracking" mémoire Master Erasmus (Univ. Stuttgart), 2002
- M8 V. Li Boun "Filtrage Particulaire appliqué au suivi de missile non-guidé" mémoire de DEA, APSI, 2003
- M9. S. Pop "extension 3D de la Flow coherence pour le filtrage des blocs sismiques" mémoire Master Erasmus (Univ. Cluj-Napoca), 2004
- M10. B. Keresztes "Processus ponctuel pour la segmentation d'objet" mémoire Master Erasmus (Univ. Cluj-Napoca), 2005
- M11. H. Poveda "Edge detection by fractional derivation in a recursive way" mémoire MASTER Erasmus (Univ. Panama), 2006 (en coll. Avec Pierre Melchior, groupe Automatique)
- M12. C. Borda "Fusion d'image par ondelette : une approche comparative des résultats" mémoire Master Erasmus (Univ. Cluj-Napoca), 2006
- M13. C. Ludusan "Fusion d'attribut sismique par maximisation de l'information mutuelle" mémoire Master Erasmus (Univ. Cluj-Napoca), 2007

Exemplaires des travaux