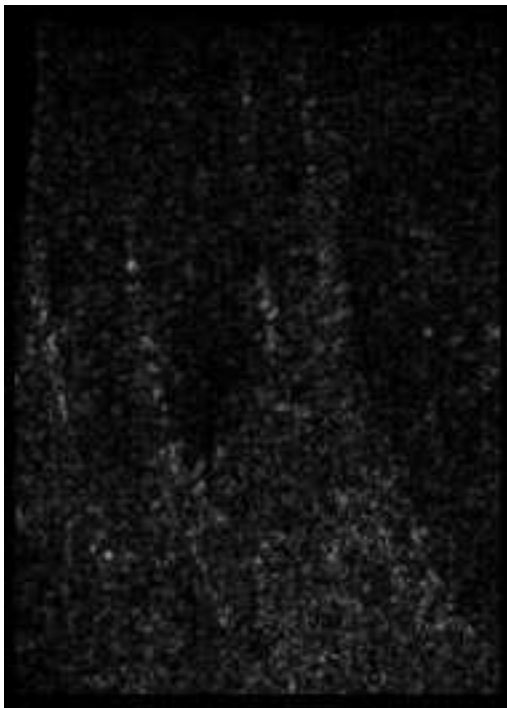
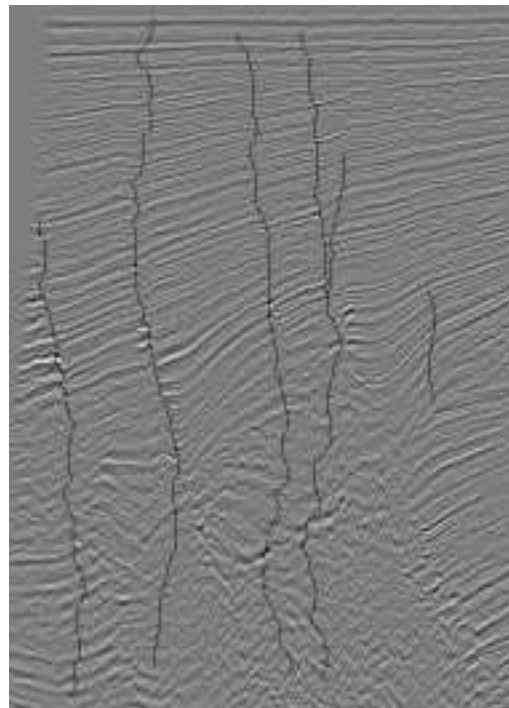


Figure 4.37: *Image des pendages à partir de l'image filtrée par filtrage adaptatif.*



(a) TO adaptative à partir de l'image filtrée



(b) Failles détectées

Figure 4.38: *Détection de failles à partir de la TO adaptée aux pendages.*

4.4.2.5 Limites de la méthode et perspectives

La méthode de détection de failles à partir de la transformée en ondelettes exposée précédemment est très bonne dans les cas où les failles se voient relativement bien à l'oeil nu. Cependant il existe des images qui apparemment ne contiennent pas de failles ou très peu alors qu'il en est tout autrement. On peut deviner sur l'image 4.39 quelques failles. Cette image fait partie d'un bloc sismique et on peut voir en faisant défiler les images comme dans un film que c'est une zone extrêmement fracturée, fractures qu'on ne peut voir sur une seule image. Il convient donc, pour ce type d'image d'utiliser des méthodes de type mouvement.

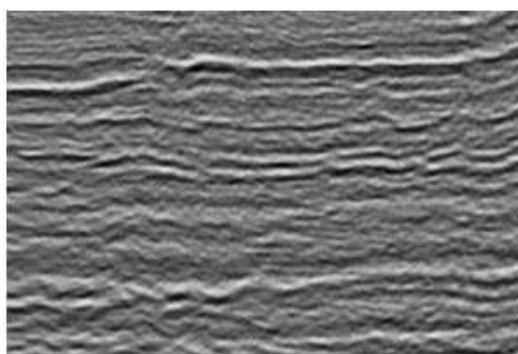


Figure 4.39: *Image contenant plusieurs failles invisibles à l'oeil nu.*

Conclusion

La segmentation d'images sismiques obtenues par sismique réflexion est un problème difficile et irrésolu jusqu'à présent. Ce travail a permis de montrer comment la transformée en ondelettes pouvait améliorer certaines étapes de cette segmentation et apporter certaines réponses.

On a tout d'abord montré comment la transformée en ondelettes unidimensionnelle appliquée à chaque colonne de l'image (représentant le signal sismique ou trace sismique) pouvait améliorer la détection des horizons (séparation entre deux couches de roches). En effet, on a vu qu'une impulsion sismique était très proche d'une ondelette mathématique autant par sa forme que par ses propriétés. La représentation d'une trace dans une base d'ondelettes adaptée permet donc de réhausser les réflexions importantes tout en éliminant le bruit résiduel. L'utilisation de l'algorithme à trous a permis, par la redondance d'informations qu'il fournit, une bonne lisibilité de la transformée en ondelettes. Plusieurs ondelettes discrètes ont été comparées et une méthode originale par l'utilisation de l'impulsion sismique comme ondelette a été apportée. Cette dernière méthode donne de bons résultats et a l'avantage de ne pas apporter de distorsions et de décalages comme le font les ondelettes mathématiques.

Les tests ont été effectués sur des images relativement petites (500×700 au maximum). Or pour des images plus grandes, les réflexions ont tendance à s'étaler et s'atténuer avec la profondeur du terrain. Ceci correspond à un changement d'échelle des ondelettes. Il faudrait alors adapter l'échelle en fonction de la profondeur ce qui ne paraît pas aisé sans connaissances a priori. Une solution serait de découper l'image en morceaux ayant des échelles voisines et d'appliquer la méthode d'amélioration des réflexions à chaque morceau.

Une méthode aboutissant à la détection de failles a également été proposée. Nous avons vu qu'une telle détection est extrêmement complexe est peu fiable avec les outils habituels de traitement d'image. Cette méthode s'appuie sur la transformée

en ondelettes directionnelles qui a la propriété de détecter les structures et les discontinuités dans une direction donnée. En appliquant cette transformée dans une direction n'appartenant pas à l'image, on obtient un alignement de maxima sur chaque faille. Celles-ci peuvent être ensuite détectées par un suivi de maximum robuste au bruit. Les résultats obtenus sont très précis dans le cas de belles failles et lorsque l'angle choisi est proche de la direction de la faille.

On a montré qu'un filtrage préalable adapté de l'image améliore sensiblement la détection dans des zones très bruitées comme les zones sourdes. On a étudié une méthode de représentation adaptative de la transformée en ondelettes pour pallier au problème d'angle. A l'aide du pendage des horizons calculés en tout point, on peut adapter l'angle de la transformée en ondelettes en tout point. Cette méthode semble prometteuse et permet de détecter les failles dans toutes les directions. Cependant, elle ne permet plus d'utiliser un algorithme de calcul rapide. De plus, le calcul du pendage est extrêmement délicat au voisinage des failles. Ceci apporte un certain bruit néfaste à la précision de la détection. Il faudrait alors utiliser des outils plus fiables pour le calcul du pendage dans les zones de failles.

Si la méthode proposée paraît très bonne dans certains cas, elle n'est pas adaptée dans d'autres. En effet, il existe des images sismiques où les failles ne sont détectables à l'oeil que par une grande connaissance de la sismique et du terrain car on ne voit pas de cassures nettes d'horizons. Les recherches doivent plutôt s'orienter vers des méthodes de type mouvement dans des blocs sismiques où on observe un mouvement différentiel des horizons de part et d'autre des failles.

Enfin, la transformée en ondelettes par l'ondelette de Morlet apparaît comme un outil prometteur dans beaucoup de domaines par sa qualité de sélectivité directionnelle. On a donc introduit une notion d'ondelette directionnelle bidimensionnelle à partir de sa transformée de Fourier et étudié quelques-unes de ses propriétés. Nous avons ensuite fourni un moyen de créer de telles ondelettes directionnelles de manière à pouvoir éventuellement en utiliser de plus adaptées que l'ondelette de Morlet déjà existante. On pourrait envisager d'étendre les notions introduites et les propriétés montrées aux dimensions supérieures à 2 pour des applications telles qu'écoulement tridimensionnel par exemple, ou les blocs sismiques. Cependant, un calcul de transformée en ondelettes en dimension supérieure à 2 commence à être relativement coûteux.

Annexe A

Coefficients d'ondelettes

Ondelette spline cubique

On donne ci-dessous les coefficients du filtre h défini à l'aide de l'analyse multi-résolution par la propriété 1.6.

n	$h(n)$
0	0.542
± 1	0.307
± 2	-0.035
± 3	-0.078
± 4	0.023
± 5	0.03
± 6	-0.012
± 7	-0.013
± 8	0.006
± 9	0.006
± 10	-0.003
± 11	-0.002

Ondelettes de Daubechies

Les notations sont ici celles du théorème 1.54 utilisé pour la définition des ondelettes à support compact.

$N = 2$		$N = 8$	
n	$h(n)$	n	$h(n)$
0	0.482962913	0	0.0544158422
1	0.836516304	1	0.312871591
2	0.224143868	2	0.675630736
3	-0.129409523	3	0.585354684
$N = 4$		4	-0.0158291053
n	$h(n)$	5	-0.284015543
0	0.230377813	6	0.000472484574
1	0.714846571	7	0.128747427
2	0.630880768	8	-0.017369301
3	-0.0279837694	9	-0.0440882539
4	-0.187034812	10	0.0139810279
5	0.0308413818	11	0.00874609405
6	0.0328830117	12	-0.00487035299
7	-0.0105974018	13	-0.000391740373
$N = 6$		14	0.000675449406
n	$h(n)$	15	-0.000117476784
1	0.111540743		
2	0.49462389		
3	0.751133908		
4	0.315250352		
5	-0.226264694		
6	-0.129766868		
7	0.0975016056		
8	0.0275228655		
9	-0.0315820393		
10	0.000553842201		
11	0.00477725751		
12	-0.00107730109		

Ondelettes biorthogonales B-splines

On reprend ici les notations du théorème 1.9 utilisé pour la définition des ondelettes biorthogonales. Les coefficients donnés sont pour $\tilde{N} = 3$.

$\tilde{N} = 3, N = 3$			$\tilde{N} = 3, N = 9$		
n	$\tilde{h}(n)$	$h(n)$	n	$\tilde{h}(n)$	$h(n)$
-3		0.0662912607	-9		-0.000679744373
-2		-0.198873782	-8		0.00203923312
-1	0.176776695	-0.154679608	-7		0.00506031922
0	0.530330086	0.994368911	-6		-0.0206189126
1	0.530330086	0.994368911	-5		-0.0141127879
2	0.176776695	-0.154679608	-4		0.0991347825
3		-0.198873782	-3		0.0123001363
4		0.0662912607	-2		-0.320191968
			-1	0.176776695	0.00205002271
			0	0.530330086	0.942125701
			1	0.530330086	0.942125701
			2	0.176776695	0.00205002271
			3		-0.320191968
			4		0.0123001363
			5		0.0991347825
			6		-0.0141127879
			7		-0.0206189126
			8		0.00506031922
			9		0.00203923312
			10		-0.000679744373

Bibliographie

- [1] JP. ANTOINE, P. CARRETTE, and R. MURENZI. “The scale-angle representation in image analysis with 2D wavelet transform”. In J. Vandewalle, R. Boite, M. Moonen, and A. Oosterlinck, editors, *Signal Processing VI: Theories and Applications*, pages 701–704. Elsevier Science, 1992.
- [2] JP. ANTOINE, P. CARRETTE, and R. MURENZI. “Wavelet analysis in image processing”. In *EUSIPCO*, 1992.
- [3] JP. ANTOINE, P. CARRETTE, R. MURENZI, and B. PIETTE. “Image analysis with two-dimensional continuous wavelet transform”. *Signal Processing*, 31:241–272, 1993.
- [4] A. ANTONIADIS and R. CARMONA. “Multiresolution analyses and wavelets for density estimation”. Preprint, 1991.
- [5] M. ANTONINI, M. BARLAUD, P. MATHIEU, and I. DAUBECHIES. “Image coding using wavelet transforms”. *IEEE Trans. Image Process.*, 1:205–220, 1992.
- [6] G. BEYLKIN. “On the representation of operators in bases of compactly supported wavelets”. *SIAM J. Numer. Anal.*, 29(6):1716–1740, 1992.
- [7] G. BEYLKIN, R. COIFMAN, and V. ROKHLIN. “Fast wavelet transforms and numerical algorithms I”. *Comm. Pure Appl. Math.*, 44:141–183, 1991.
- [8] A. BIJAOU. “Algorithmes de la transformation en ondelettes : Application à l’imagerie astronomique”. In *Colloque international ondelettes et paquets d’ondes*, Rocquencourt (France), juin 1991.
- [9] A. BIJAOU. “Astronomical image inventory by the wavelet transform”. In Y. Meyer and S. Roques, editors, *Wavelets and Applications*, pages 551–556. Frontières, Gif/Yvette, 1993.

-
- [10] A. BIJAOU, J.L. STARCK, and F. MURTAGH. “Restauration des images multi-échelles par l’algorithme à trous”. *Traitement du signal*, 11(3):229–243, 1994.
- [11] Ph. BOLON, J.L. VILA, G. ODDOU, C. THIBAUT, and E. VARIN. Laboratoire LAMII/CESALP - Université de savoie. *Rapport d’avancement, GDR TDSI-ELF Aquitaine Production. Contrat EAP No 9393*, Septembre 1995.
- [12] E. BOURNAY. *Segmentation d’images sismiques par analyse de texture et filtrage non linéaire*. Rapport de DEA de Mathématiques Appliquées, Université Joseph Fourier, Juin 1993.
- [13] E. BOURNAY-BOUCHEREAU and J.M. CHASSERY. Laboratoire INFODIS-TIMC Grenoble. *Rapport d’avancement, GDR TDSI-ELF Aquitaine Production. Contrat EAP No 9393*, Septembre 1995.
- [14] P. J. BURT and H. ADELSON. “Unitary representations of the affine groupe”. *IEEE Transactions on Computers*, 31, April 1983.
- [15] S. CHEN and D. L. DONOHO. “Atomic decomposition by basis pursuit”. Preprint, May 1995.
- [16] J.P. COCQUEREZ and J.L. PINEL. Laboratoire ETIS Cergy. *Rapport d’avancement, GDR TDSI-ELF Aquitaine Production. Contrat EAP No 9393*, Septembre 1995.
- [17] A. COHEN. “Ondelettes, analyses multiresolutions et filtres miroirs en quadrature”. *Ann. Inst. H. Poincaré, Anal. Non Linéaire*, 7(5):439–459, 1990.
- [18] A. COHEN, I. DAUBECHIES, and J. FEAUVEAU. “Bi-orthogonal bases of compactly supported wavelets”. *Comm. Pure Appl. Math.*, 45:485–560, 1992.
- [19] J. M. COMBES, A. GROSSMANN, and Ph. TCHAMITCHIAN, editors. *Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space*. Inverse problems and theoretical imaging. Springer-Verlag, 1989.
- [20] M. COULIBALY. *Analyse par ondelettes : quelques aspects numériques et application à des signaux océaniques simulés et à l’estimation de densité de probabilité*. PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1992.
- [21] I. DAUBECHIES. “Orthonormal bases of compactly supported wavelets”. *Comm. on Pure and Applied Math.*, XLI:909–996, 1988.

-
- [22] I. DAUBECHIES. “The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis”. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 36(5):961–1005, 1990.
- [23] I. DAUBECHIES. *Ten Lectures on Wavelets*. Number 61 in CBMS-NSF Series in Applied Mathematics. SIAM, Philadelphia, 1992.
- [24] I. DAUBECHIES and J. C. LAGARIAS. “Two-scale difference equations I. Existence and global regularity of solutions”. *SIAM J. Math. Anal.*, 22(5):1388–1410, 1991.
- [25] D. L. DONOHO. “Nonlinear Solution of Linear Inverse Problems by Wavelet-Vaguelette Decomposition”. *Report*, 1992.
- [26] D. L. DONOHO. “Wavelet Shrinkage and W.V.D.: a 10-minute tour”. *Report*, 1992.
- [27] M. FARGE, Y. GUEZENNEC, C. M. HO, and C. MENEVEAU. “Continuous wavelet analysis of coherent structures”. In *Proceedings of the Summer Program*, pages 331–348, Center of Turbulence Research, Stanford Univ., 1990.
- [28] M. FARGE, N. KEVLAHAN, V. PERRIER, and E. GOIRAND. “Wavelets and turbulence”. *Proc. of the IEEE*, 84(4):639–669, april 1996.
- [29] J. C. FEAUVEAU. *Analyse multirésolution par ondelettes non orthogonales et bancs de filtres numériques*. PhD thesis, Université de Paris Sud, 1990.
- [30] J. C. FEAUVEAU. “Analyse multirésolution pour les images avec un facteur de résolution $\sqrt{2}$ ”. *Traitement du signal*, 7(2):117–128, 1990.
- [31] P. FLANDRIN. *Temps-Fréquence*. HERMES, 1993.
- [32] E. FOUFOULA-GEORGIU and P. KUMAR. *Wavelets in Geophysics*. Number 4 in wavelet analysis and its applications. Academic Press, London, 1994.
- [33] D. GABOR. “Theory of communication”. *J. Inst. Elect. Eng.*, 93:429–457, 1946. London.
- [34] C. GALAND. *Codage en sous-bandes: théorie et application à la compression numérique du signal de parole*. PhD thesis, Université de Nice, 1983.
- [35] C. GASQUET and P. WITOMSKI. *Analyse de Fourier et applications, Filtrage, Calcul numérique, Ondelettes*. Masson, 1990.

- [36] P. GAUSSIER and J.P. COCQUEREZ. “Utilisation des réseaux de neurones pour la reconnaissance de scènes complexes : simulation d’un système comprenant plusieurs aires corticales”. *Traitement du signal*, 8(6):441–466, 1991.
- [37] P. GOUPILLAUD, A. GROSSMANN, and J. MORLET. “Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis”. *Geoexploration*, 23:85–102, 1984. Elsevier Science Publishers, B. V. Amsterdam.
- [38] A. GROSSMANN and J. MORLET. “Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape”. *SIAM J. Math. Anal.*, 15(4):723–736, 1984.
- [39] H. J. GRUBB and A. T. WALDEN. “Characterising seismic time series using the discrete wavelet transform”. In *56th International Meeting of EAEG*, Vienna, 1994.
- [40] G. HENRY. *Géophysique des bassins sédimentaires*. TECHNIP.
- [41] M. HOLSCHNEIDER, R. KRONLAND-MARTINET, J. MORLET, and Ph. TCHAMITCHIAN. The “algorithme à trous”. Technical Report CPT-88/P.2115, Centre de Physique Théorique, Marseille, May 1988.
- [42] M. HOLSCHNEIDER, R. KRONLAND-MARTINET, J. MORLET, and Ph. TCHAMITCHIAN. “A real-time algorithm for signal analysis with the help of the wavelet transform”. In *Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space*, pages 286–297. Springer, IPTI, Berlin, 1989.
- [43] M. HOLSCHNEIDER and P. TCHAMITCHIAN. “Régularité locale de la fonction non-différentiable de Riemann”. In P. G. Lemarié, editor, *Les ondelettes en 1989, Lectures notes in Mathematics*, pages 102–124. Springer-Verlag, New York, 1989.
- [44] F. JACQUIS. *Images SAR*. PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1996.
- [45] N. KESKES, A. BOULANOUAR, and O. FAUGERAS. “Application of image analysis technique to seismic data”. In *Proceedings of ICASSP*, pages 855–858, Paris, 1982.
- [46] M. LAVERGNE. *Méthodes sismiques*. TECHNIP, IFP, 1986.
- [47] P.-G. LEMARIÉ. “Ondelettes à localisation exponentielle”. *J. Math. Pures Appl.*, 67(3):227–236, 1988.

- [48] P.-G. LEMARIÉ, editor. *Les Ondelettes en 1989*. Number 1438 in Lecture Notes in Math. Springer-Verlag, 1990.
- [49] P.-G. LEMARIÉ and Y. MEYER. “Ondelettes et bases hilbertiennes”. *Rev. Mat. Iberoamericana*, 2:1–18, 1986.
- [50] M.D. LEVINE and A.M. NAZIF. “Rule-based image segmentation : a dynamic control strategy approach”. *Computer vision, graphics and image processing*, 32:104–126, 1985.
- [51] P.L. LOVE and M. SIMAAN. “Segmentation of a seismic section using image processing and artificial intelligence techniques”. *Pattern Recognition*, 18(6):409–419, 1985.
- [52] S. MALLAT and W. L. HWANG. “Singularity detection and processing with wavelets”. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 38(2):617–643, 1992.
- [53] S. G. MALLAT. “A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation”. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 11(7):674–693, 1989.
- [54] S. G. MALLAT. “Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$ ”. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 315(1):69–87, Sept. 1989.
- [55] S. G. MALLAT. “Zero crossings of a wavelet transform”. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 37(4):1019–1033, 1991.
- [56] Y. MEYER. “Wavelets : their past and their future”. In [63].
- [57] Y. MEYER. “Principe d’incertitude, bases hilbertiennes et algèbres d’opérateurs”. In *Séminaire Bourbaki*, number 662, 1985-1986.
- [58] Y. MEYER. “Ondelettes et fonctions splines”. In *Sem. Equ. aux Dérivées Partielles*, Ecole Polytechnique, Paris, France, Décembre 1986.
- [59] Y. MEYER. “Ondelettes, fonctions splines et analyse graduée”. In *Cahiers du Ceremade*, number 8703, Université Paris-Dauphine, 1987.
- [60] Y. MEYER. *Ondelettes et Opérateurs, I: Ondelettes, II: Opérateurs de Calderón-Zygmund, III: (with R. Coifman), Opérateurs multilinéaires*. Hermann, Paris, 1990.
- [61] Y. MEYER, editor. *Wavelets and Applications*. Number 20 in Research notes in Applied Mathematics. Springer Verlag, 1991.

-
- [62] Y. MEYER. *Ondelettes : Algorithmes et Applications*. Armand Colin, Paris, 1992.
- [63] Y. MEYER and S. ROQUES. *Progress in wavelet analysis and applications*. Frontières, Paris, 1993.
- [64] J. MORLET. “Sampling theory and wave propagation”. In *12th International Conference on Pattern Recognition*, october 1994.
- [65] R. MURENZI. *Ondelettes multidimensionnelles et applications à l’analyse d’images*. PhD thesis, Université catholique de Louvain, Belgique, 1990.
- [66] C. J. PIKE. “Analysis of high resolution marine seismic data using the wavelet transform”. In [32].
- [67] I. PITAS and C. KOTROPOULOS. “A texture-based approach to the segmentation of seismic images”. *Pattern Recognition*, 25(9):929–945, 1992.
- [68] I. PITAS and A. N. VENETSANOPOULOS. “Towards a knowledge-based system for automated geophysical interpretation of seismic data (agis)”. *Signal Processing*, 13:229–253, 1987.
- [69] L. PLANTIÉ. “Ondelette tridimensionnelle adaptée au filtrage de structures allongées”. Technical Report 92062, Laboratoire d’Automatique et d’Analyse des Systèmes, mars 1992.
- [70] A. R. RAO and B. G. SCHUNCK. “Computing oriented texture fields”. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 53:157–185, 1991.
- [71] N. SAITO. “Simultaneous noise suppression and signal compression using a library of orthonormal bases and the minimum description length criterion”. In [32].
- [72] M. J. SHENSA. “Wedding the à trous and Mallat algorithms”. *IEEE Trans. Signal Process.*, 40(10):2464–2482, 1992.
- [73] G. SIBILLE. *Segmentation d’images sismiques à base de connaissances*. PhD thesis, Université de Paris Sud, 1990.
- [74] D. SINHA and A. H. TEWFIK. “Low bit rate transparent audio compression using adapted wavelets”. *IEEE Trans. Signal Process.*, 41(12):3463–3479, december 1983.
- [75] Ph. TCHAMITCHIAN. “Biothogonalité et théorie des opérateurs”. *Rev. Mat. Iberoamericana*, 3(2), 1987.

-
- [76] N. THIRION, J. MARS, P. VOLANT, and J.L. MARI. “Wavelet transform: application to acoustic logging”. *Revue de l’Institut Français du Pétrole*, 49(2), mars-avril 1994.
- [77] P. TU, A. ZISSERMAN, and I. MASON. “Seismic time section analysis using machine vision”. Oxford University, Department of Engineering Science.
- [78] P. TU, A. ZISSERMAN, I. MASON, and I. COX. “Extraction of events from 3D volumes of seismic data”. In *Proc. 51st Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists*, 1981.
- [79] M. UNSER. “Texture classification and segmentation using wavelet frames”. *IEEE Trans. Image Process.*, 4(11):1549–1560, november 1995.
- [80] A. T. WALDEN. “Multiresolution analysis and wavelets I: Deterministic results for continuous functions and discrete sequences”. Technical report, Imperial College of Science, Technology and Medicine, September 1994. TR-94-08.
- [81] A. T. WALDEN. “Spatial clustering: using simple summaries of seismic data to find the edge of an oil-field”. *Appl. Statist.*, 43(2):385–398, 1994.
- [82] K. H. WATERS. *Reflection Seismology - A Tool for Energy Resource Exploration*. KRIEGER, Malabar, Florida, 1992.
- [83] W. WISNOE, P. GAJAN, A. STRZELECKI, C. LEMPEREUR, and J.M. MATHÉ. “Analyse de visualisations d’écoulements turbulents à l’aide de la transformée en ondelettes”. *Traitement d’images*, 2:250–255.
- [84] P. ZAMPERONI. “Adaptive rank-order filter for image processing based on local anisotropy measures”. *Digital Signal Processing*, 2:174–182, 1992.