



HAL
open science

Fusion de données et modélisation de l'environnement

Thierry Ranchin

► **To cite this version:**

Thierry Ranchin. Fusion de données et modélisation de l'environnement. Energie électrique. Université Nice Sophia Antipolis, 2005. <tel-00520780>

HAL Id: tel-00520780

<https://theses.hal.science/tel-00520780v1>

Submitted on 24 Sep 2010

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.



HAL Authorization

Fusion de données et modélisation de l'environnement

Habilitation à diriger les recherches
de
Thierry Ranchin

Habilitation à Diriger les Recherches
Mai 2005

Ecole Doctorale
Sciences Fondamentales et Appliquées

Université de Nice- Sophia Antipolis

Sommaire

1	Introduction	2
2	Outils mathématiques et exemples de modélisation	4
2.1	Modélisation hiérarchique	4
2.2	La transformée en ondelettes	4
2.3	L'analyse multirésolution	5
2.4	Algorithmes de transformée en ondelettes et d'analyse multirésolution	7
2.4.1	L'algorithme de Mallat	7
2.4.2	L'algorithme "à trous"	10
2.5	Exemple d'utilisation pour la modélisation hiérarchique des phénomènes physiques	11
2.6	Quelques commentaires...	13
3	Applications et innovations	15
3.1	Extraction de la voirie	15
3.1.1	Position du problème	15
3.1.2	Modélisation surfacique de la voirie : approche pixel	16
3.1.3	Modélisation surfacique de la voirie : approche vecteur	19
3.1.4	Exemple	23
3.1.5	Modélisation surfacique de la voirie: conclusions	24
3.1.6	Conclusions et Perspectives	25
3.2	Fusion d'images : le concept ARSIS	26
3.2.1	Introduction	26
3.2.2	Conceptualisation du problème	27
3.2.3	Exemple	30
3.2.4	Conclusions et Perspectives	34
3.3	Extraction des paramètres de vent à partir d'une seule image ROS	35
3.4	Autres domaines	37
4	Valorisation	39
4.1	Publications et brevets	39
4.2	Distinctions	39
4.3	Irrigation du tissu économique	39
5	Formation	40
5.1	Encadrement en 3 ^{ème} cycle	40
5.2	Enseignements	40
5.3	Formation continue	40
6	Animation	42
6.1	Interne au laboratoire	42
6.2	Externe au laboratoire	42
7	Conclusions et Perspectives	44
	Annexe 1 : Curriculum vitae	46
	Annexe 2 : Liste détaillée des publications	49

Annexe 3 : Encadrements d'étudiants	59
Annexe 4 : Liste des contrats	62

1 Introduction

Les travaux effectués dans le cadre de mes activités de recherche et d'enseignements au sein du Centre Energétique et Procédés de l'Ecole des Mines de Paris concernent la description et la compréhension des problématiques liées à l'environnement dans le cadre du protocole de Kyoto. Dans ce cadre, les satellites d'observation de la Terre sont un formidable outil d'investigation. Ils permettent notamment une perception des phénomènes physiques au travers des structures dans l'espace et leur évolution dans le temps. Mes travaux exploitent les observations et mesures satellitaires (images, profils). Ils s'appuient sur la modélisation des structures observées dans l'environnement et sur la fusion de données. Pour cette dernière, j'ai adopté la définition proposée par le groupe de travail de l'association EARSeL (European Association of Remote Sensing Laboratories) : "la fusion de données constitue un cadre formel dans lequel s'expriment les moyens et techniques permettant l'alliance des données provenant de sources diverses. Elle vise à obtenir des informations de meilleure qualité ; la définition de meilleure qualité dépendant de l'application". Elle vise donc à tirer le meilleur parti possible de l'ensemble des observations et informations disponibles sur notre environnement.

Ce document propose une synthèse de mes activités de recherche, de valorisation, de formation et d'animation regroupées autour de la fusion de données et de la modélisation de l'environnement.

Dans mon approche des problèmes scientifiques, j'ai essayé de suivre une démarche qui m'a permis de clarifier les problèmes étudiés, d'explorer le plus complètement possible les solutions proposées et les apports de mes travaux par rapport à l'existant. Bien que cette démarche ne soit pas très originale, elle m'a permis d'aboutir à un certain nombre de résultats pertinents pour la communauté scientifique dans le domaine de l'observation de la Terre. Elle se décompose de la manière suivante :

- Expression du problème général à partir du problème particulier
- Conceptualisation
- Développement de solutions les plus générales possibles ou de méthodes génériques
- Application au problème particulier
- Evaluation de l'innovation et des performances par rapport à l'existant
- Applications à d'autres domaines et évaluation

Cette démarche met l'accent principalement sur la conceptualisation et sur l'évaluation des résultats. La conceptualisation permet une meilleure compréhension du problème étudié. Elle offre la possibilité de mieux définir et formaliser le problème, et permet de l'étudier dans un cadre formel. La démarche d'évaluation de la qualité permet de mettre en place les moyens d'une comparaison des différentes méthodes existantes et de définir en fonction de la conceptualisation du problème, des critères permettant d'évaluer l'apport des solutions proposées.

Cette volonté de clarification de ma démarche est alimentée, notamment, par les relectures effectuées pour différents journaux scientifiques. Dans certaines propositions d'articles, j'ai pu constater très régulièrement des manques dans l'évaluation de la qualité des résultats, ainsi que dans la généralisation des résultats obtenus. Aussi, j'ai essayé dans mes travaux d'appliquer la démarche décrite précédemment. Elle a permis des avancées pertinentes, reprises par d'autres chercheurs par exemple, dans l'extraction de la voirie ainsi que dans le domaine de la fusion d'images.

J'expose dans la première partie les principaux outils mathématiques que j'ai utilisés, notamment la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution. Quelques exemples illustrent le bénéfice d'une approche hiérarchique de l'organisation de l'information.

La deuxième partie explore les principaux champs d'application de mes recherches. Regroupée autour des développements méthodologiques, de l'étude de la ville, de l'énergie et de l'environnement, elle montre les principaux apports de mes travaux. Deux applications sont présentées de manière plus détaillée montrant l'apport des outils présentés précédemment et de la démarche utilisée. Il s'agit de l'extraction de la voirie en milieu urbain, et de la fusion d'images au travers du concept ARSIS.

La troisième partie de ce mémoire présente la valorisation de mes travaux au travers des publications, de l'irrigation du tissu économique, de la formation et de l'animation du laboratoire.

Enfin, la dernière partie est consacrée à la présentation de quelques perspectives de recherche.

En annexes, sont énumérés la liste de mes publications, la liste des doctorants et stagiaires encadrés, la liste des principaux contrats auxquelles j'ai participé.

2 Outils mathématiques et exemples de modélisation

2.1 Modélisation hiérarchique

L'innovation principale qui ressort de mes travaux est l'application des méthodes temps-fréquence et espace-échelle à l'étude des phénomènes représentés par les moyens d'observation de la Terre. Ceci a notamment permis une contribution importante à la modélisation hiérarchique des phénomènes observés et une conceptualisation du problème de la fusion d'images de résolutions spatiale et spectrale différentes.

Les phénomènes naturels capturés par les systèmes d'observation de la Terre sont complexes. Nous cherchons généralement à les appréhender et à comprendre la physique qui se cache derrière ces images. Or, pour modéliser ces phénomènes complexes, il est souvent nécessaire de les simplifier afin d'obtenir un modèle grossier représentant les paramètres prépondérants. Puis, l'amélioration du modèle consiste en une complexification croissante prenant en compte les paramètres secondaires et amenant une meilleure représentation physique des phénomènes.

Les méthodes espace-échelle s'intègrent dans ce mode de construction des modèles, en offrant des moyens d'analyse comprenant cet aspect à "plusieurs échelles" de la modélisation. Les décompositions multi-échelles offrent une vision intégrant à la fois l'espace et les échelles des phénomènes. La transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution sont des exemples des outils mathématiques qui portent ces possibilités. Ils sont une des solutions proposées pour appréhender la complexité des phénomènes naturels.

2.2 La transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes est présentée ici sous sa forme continue et mono-dimensionnelle. Sa propriété principale est sa capacité à adapter la fenêtre d'analyse aux phénomènes étudiés permettant d'accéder ainsi à une information de fréquence localisée. La transformée en ondelettes permet d'obtenir une représentation temps-fréquence des signaux étudiés. Dans le cas d'images, on accède à une représentation espace-échelle des phénomènes étudiés. Nous verrons dans la suite quelques exemples permettant d'illustrer l'adaptation des ondelettes à nos problèmes.

Comme la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes permet la décomposition d'un signal ou d'une image sur une base de fonctions élémentaires : les ondelettes. Cette base est générée par dilatations et translations d'une seule fonction appelée ondelette mère :

$$\psi_{a,b} = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (1)$$

où $a, b \in \mathbb{R}$ et $a \neq 0$. a est appelé pas de dilatation et b pas de translation.

De nombreuses bases d'ondelettes existent. Ce sont toutes des fonctions oscillantes, bien localisées à la fois en temps et en fréquence. Toutes les ondelettes ont des propriétés communes comme la régularité, l'oscillation et la localisation et satisfont une condition d'admissibilité. Comme il n'est pas dans mon propos d'exposer ici toute la théorie des ondelettes, le lecteur trouvera plus de détails

sur les propriétés des ondelettes dans le livre d'Yves Meyer¹, dans le livre d'Ingrid Daubechies² ou dans la littérature abondante sur ce sujet.

Même si les ondelettes ont des propriétés communes, chacune d'elles conduit à une décomposition unique du signal ou de l'image. Dans le cas mono-dimensionnel, la transformée en ondelettes continue d'une fonction $f(x)$ s'écrit :

$$WT_f(a, b) = \left\langle f, \psi_{a,b} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx \quad (2)$$

où $\psi_{a,b}$ est définie par l'équation 1 et $\overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)}$ est le complexe conjugué de ψ . $WT_f(a, b)$ représente l'information contenue dans $f(x)$ à l'échelle a et à la position b . Pour a et b fixés, $WT_f(a, b)$ est appelé coefficient d'ondelettes. Le calcul de la transformée en ondelettes pour chaque échelle et pour chaque position d'un signal permet d'accéder à une représentation locale de ce signal. Ce processus peut être inversé et le signal original reconstruit parfaitement (sans perte) depuis sa décomposition en ondelettes par :

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WT_f(a, b) \psi_{a,b}(x) \frac{dad b}{a^2} \quad (3)$$

où C_ψ est la condition d'admissibilité de l'ondelette-mère. Cette dernière équation peut être interprétée de deux manières :

- on peut reconstruire $f(x)$ quand on connaît sa transformée en ondelettes,
- on peut écrire $f(x)$ comme une superposition d'ondelettes.

Ces deux points de vue conduisent à des applications différentes qui sont, d'une part le traitement et, d'autre part l'analyse des signaux.

Il est nécessaire de noter que la transformée en ondelettes continue introduit une représentation très redondante de l'information contenue dans le signal. Cette redondance pourra être exploitée dans certains cas (par exemple, pour l'étude de l'évolution de l'information suivant les différentes échelles d'un signal), mais pourra constituer un handicap dans d'autres cas (par exemple, pour la compression d'images).

2.3 L'analyse multirésolution

L'association de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution constitue un outil pratique et puissant d'analyse et de traitement des images de télédétection.

Le concept d'analyse multirésolution tel que l'a introduit Stéphane Mallat³, est issu des algorithmes pyramidaux⁴. Mallat s'est penché sur le problème de la vision et de l'analyse de l'information

¹ Y. Meyer. *Ondelettes et opérateurs 1: Ondelettes*. Hermann, Paris, France, 215 p, (1990).

² I. Daubechies. *Ten lectures on wavelets*. CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics 61, SIAM, Philadelphia, USA, 357 p, (1992).

³ S. G. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, 7, pp. 674-693, (1989).

contenue dans une image. Il a décrit dans son article de 1989, les fondements mathématiques de l'analyse multirésolution. Comme nous travaillons sur des images numériques, il est nécessaire de définir une résolution de référence, la taille du point-image ou *pixel*, pour mesurer les variations locales de l'image.

La figure 1 permet une description simple de l'analyse multirésolution et plus généralement, des algorithmes pyramidaux. Les algorithmes pyramidaux permettent de "fabriquer" des approximations successives et de plus en plus grossières de l'image originale. La base de la pyramide correspond à l'image originale. Quand on "monte" dans la pyramide, les différents étages représentent les approximations successives de l'image originale. La limite théorique de ces algorithmes est le sommet de la pyramide qui correspond à un pixel unique. La différence d'information existante entre deux approximations successives est décrite par les coefficients d'ondelettes. L'analyse multirésolution est un cas particulier des algorithmes pyramidaux.

Pour décrire les algorithmes pyramidaux, Yves Meyer utilise l'exemple de la cartographie dans *Les ondelettes. Algorithmes et applications*, page 62 :

"Nous voyons, sur cet exemple, apparaître l'idée fondamentale d'une représentation de l'image par un arbre. Dans le cas de la cartographie, le tronc serait la mappemonde et en cheminant vers les branches, les ramures, les feuilles, on accéderait à des cartes couvrant des régions de plus en plus petites et fournissant des détails de plus en plus fins, détails qui ne figureraient pas au niveau inférieur.

Pour interpréter cette représentation de la cartographie à l'aide d'un algorithme pyramidal, il conviendra de renverser les rôles du bas et du haut..."

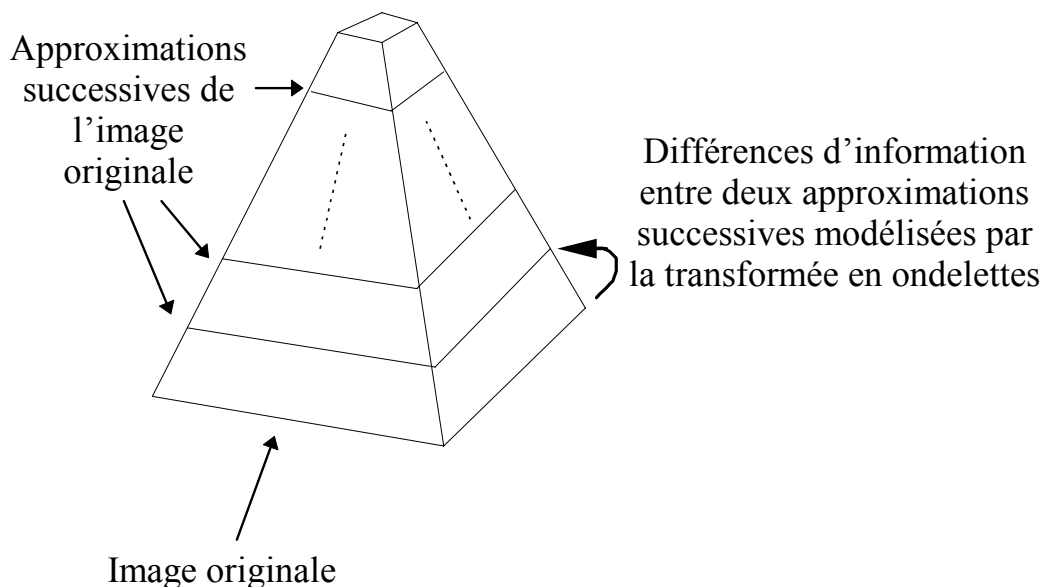


Figure 1. Représentation des approximations successives d'une même image à l'aide d'un algorithme pyramidal.

⁴ P. J. Burt, E. H. Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Transactions on Communications*, 31, 4, pp. 532-540, (1983).

2.4 Algorithmes de transformée en ondelettes et d'analyse multirésolution

2.4.1 L'algorithme de Mallat

Cet algorithme est basé sur la description pyramidale de l'analyse multirésolution. Le calcul des approximations est effectué à l'aide d'une base de fonctions appelées fonctions d'échelles. Cette base est générée de la même manière que les bases d'ondelettes.

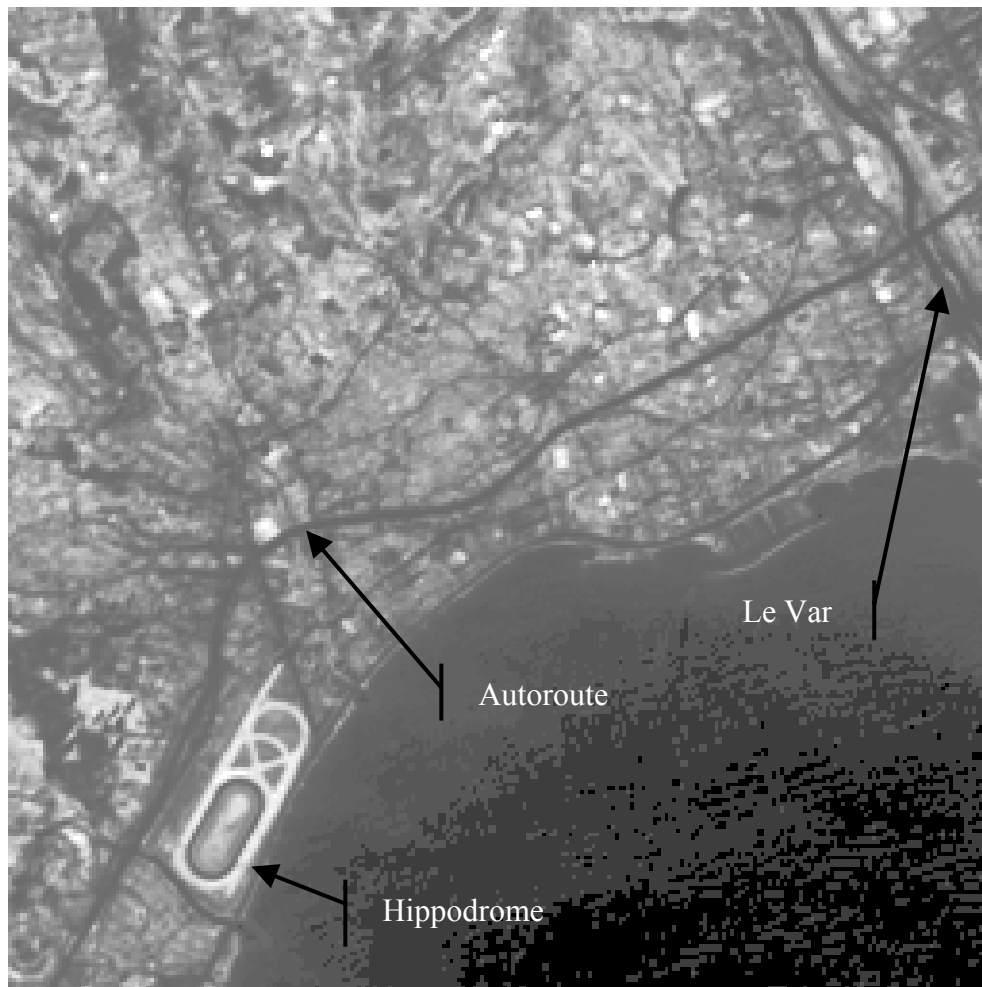
L'application des ondelettes et de la fonction d'échelle s'effectue pour les images de manière séparable en lignes puis en colonnes. La dilatation de l'ondelette et de la fonction d'échelle est obtenue par sous-échantillonnage de l'image originale. Les approximations successives de l'image originale sont appelées image de contexte. La première approximation contient toutes les échelles dont la taille est supérieure à la moitié de celle de l'image d'origine. Les trois images de coefficients d'ondelettes contiennent les échelles comprises entre la résolution de l'image originale et celle de la première image d'approximation dans les directions diagonale, verticale et horizontale. La figure 2 représente la décomposition de l'information d'une image à l'aide de l'algorithme de Mallat.

Image d'approximation (toutes les échelles supérieures ou égales à la résolution 2^{j+1})	Image des structures "horizontales" à la résolution 2^{j+1}	Image des structures "horizontales" à la résolution 2^j
Image des structures "verticales" à la résolution 2^{j+1}	Image des structures "diagonales" à la résolution 2^{j+1}	
Image des structures "verticales" à la résolution 2^j		Image des structures "diagonales" à la résolution 2^j

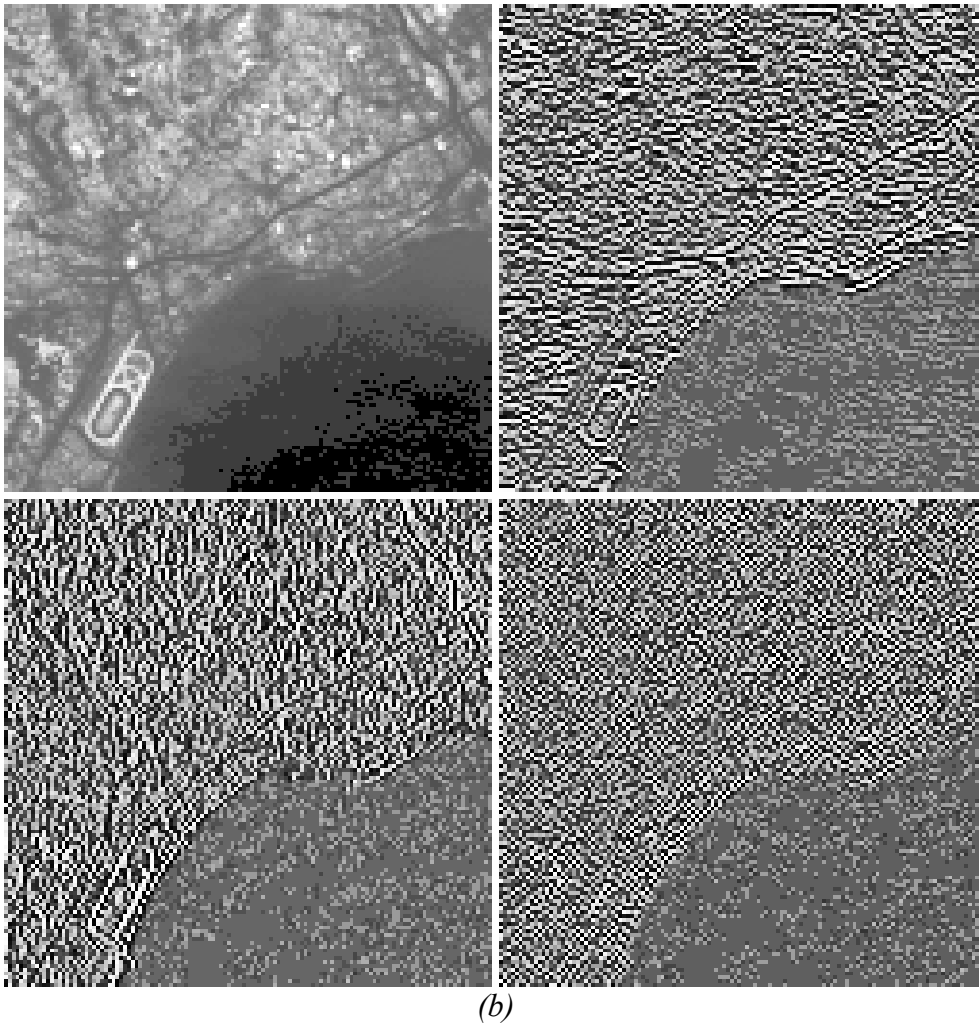
Figure 2. Présentation d'une analyse multirésolution réalisée à l'aide de l'algorithme de Mallat.

La figure 3a est un extrait d'une image du satellite SPOT-1 dans la bande XS3, acquise le 24 juillet 1986 au dessus de la Côte d'Azur. La résolution spatiale de l'image est de 20 m et la bande spectrale du capteur est $[0,79 - 0,89 \mu\text{m}]$. La zone comprend un hippodrome (coin inférieur gauche), une partie de la mer Méditerranée avec le port de Saint Laurent du Var (coin inférieur droit). L'autoroute, en sombre, traverse la zone du coin inférieur gauche au coin supérieur droit. Une

hiérarchie de routes est visible dans le coin supérieur droit, la partie en haut à gauche contient des vallées et des collines. Le fleuve Var, perpendiculaire à l'autoroute, est visible en sombre, en haut à droite.



(a)



(b)
 Figure 3: (a) Image originale XS3 (copyright CNES 1986) ; (b) Analyse multirésolution de (a) calculée à l'aide de l'algorithme de Mallat et présentée comme la figure 2.

La figure 3b représente la première itération de l'analyse multirésolution utilisant la transformée en ondelettes à l'aide de l'algorithme de Mallat. L'image dans le coin supérieur gauche, l'approximation, contient toutes les structures dont la résolution spatiale est supérieure à 40 m. L'image dans le coin inférieur droit représente les structures dont l'échelle est comprise entre 20 et 40 m dans la direction diagonale. Cette image contient peu d'informations, mais la limite terre-mer est visible. L'image dans le coin inférieur gauche représente les structures ayant ces mêmes échelles, mais dans la direction verticale. La composante verticale des phénomènes présents dans l'image y est modélisée. Les rues et routes orientées sud-nord sont présentes et la composante verticale du fleuve Var est reconnaissable. L'image dans le coin supérieur droit contient les structures ayant une échelle comprise entre 20 et 40 m dans la direction horizontale. L'autoroute et la partie de la côte orientée est-ouest sont des exemples des structures que l'on peut reconnaître assez facilement dans cette image.

A partir de cette image d'approximation et des images de coefficients d'ondelettes, l'image originale est reconstruite exactement.

2.4.2 L'algorithme "à trous"⁵

Dans cet algorithme, une seule fonction d'échelle est utilisée. L'approximation de l'image originale, est obtenue par filtrage et l'image de coefficients d'ondelettes est obtenue par soustraction de l'image originale et de l'approximation. Cet algorithme permet d'obtenir à chaque échelle une approximation et une image de détails non-directionnelle. Pour obtenir la dilatation de l'ondelette, un zéro est ajouté entre chacun des coefficients d'ondelettes. Ainsi, aucun sous-échantillonnage de l'image n'est appliqué et toutes les images obtenues ont la même taille. La reconstruction est obtenue par sommation de la dernière approximation obtenue et de toutes les images de coefficients d'ondelettes calculées.

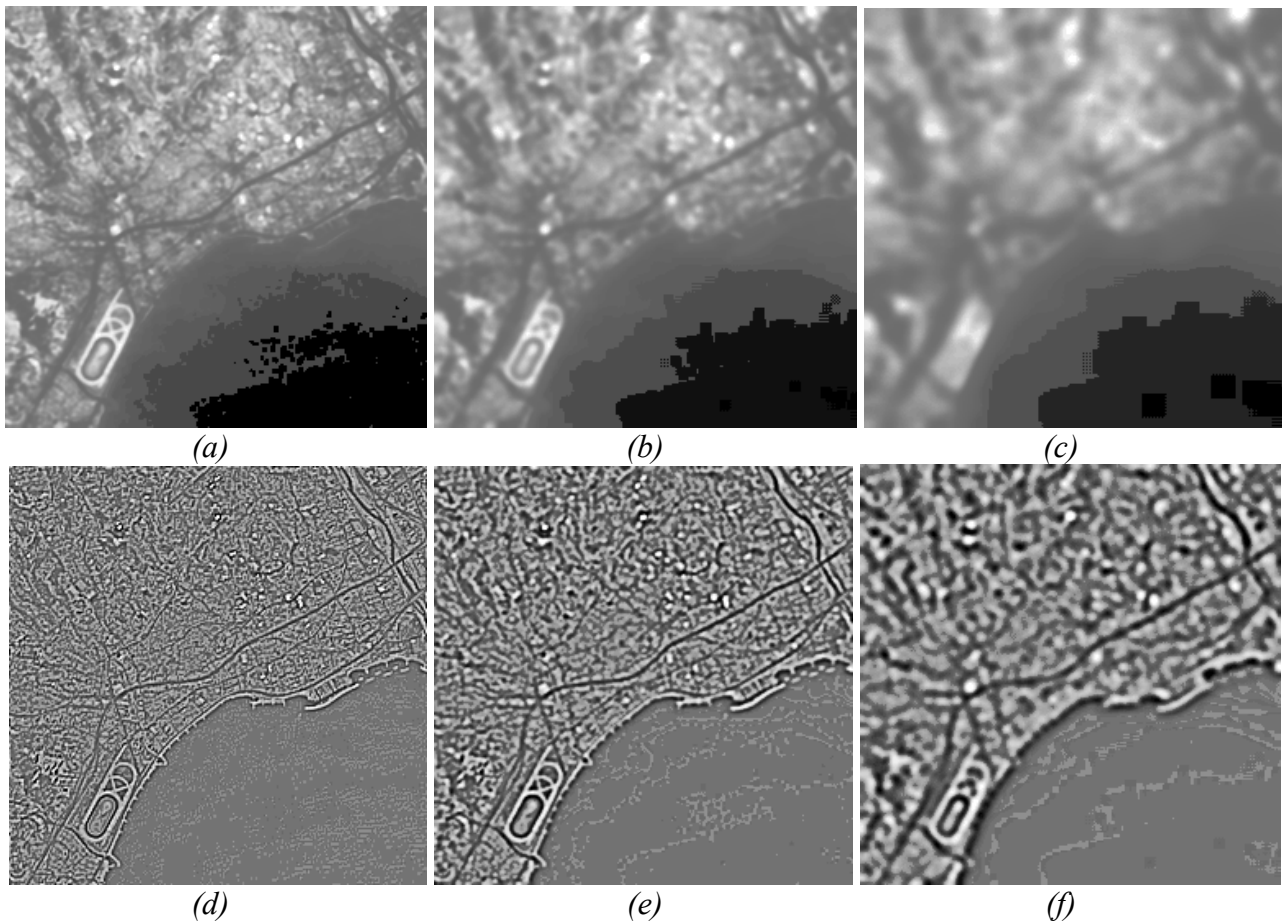


Figure 4: (a) première image de contexte obtenue par application de l'algorithme à trous à l'image figure 3a; (b) deuxième image de contexte; (c) troisième image de contexte; (d) première image de coefficients d'ondelettes; (e) seconde image de coefficients d'ondelettes; (f) troisième image de coefficients d'ondelettes .

Les figures 4a à 4c représentent les approximations, calculées à partir de la figure 3a en utilisant l'algorithme à trous. L'image originale à une résolution spatiale de 20 m. La figure 4a représente les structures dont la résolution est supérieure ou égale à 40 m. Dans cette figure, les petites structures comprises entre 20 et 40 m ont été filtrées. Les petites rues et les petites vagues présentes dans l'image originale ont disparues. La figure 4d représente, dans toutes les directions, toutes les structures ayant une échelle comprise entre 20 et 40 m. Cette image représente la différence

⁵ Dutilleux, P., 1989. An implementation of the "algorithme à trous" to compute the wavelet transform. In: Combes, J. M., Grossmann, A., Tchamitchian, Ph. (Eds.), Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space. Springer, Berlin, pp. 298-304.

d'information entre la figure 3a et la figure 4a. Elle modélise les composantes de l'image originale à ces échelles et met en évidence le fait que même une grande structure comme l'hippodrome ou le trait de côte, a une composante dans les petites échelles. Cette structure est visible depuis la résolution spatiale de l'image jusqu'à son échelle caractéristique qui peut être très supérieure à la taille de l'image.

Les figures 4b et 4c représentent respectivement les structures ayant une échelle supérieure ou égale à 80 et 160 m. Ces images mettent en évidence le lissage progressif de l'image originale et la disparition des structures d'échelles inférieures. Ainsi dans la figure 4c, les anneaux internes de l'hippodrome ont disparus et seule l'autoroute est encore facilement identifiable. Les figures 4e et 4f représentent respectivement les structures ayant une échelle comprise entre 40 et 80 m, et entre 80 et 160 m. Le fait que l'ensemble des images conservent la taille de l'image originale facilite l'analyse des phénomènes composant une image.

2.5 Exemple d'utilisation pour la modélisation hiérarchique des phénomènes physiques

Un exemple intéressant pour la démonstration de l'apport des méthodes multi-échelles dans le cadre de la modélisation hiérarchique des phénomènes physiques est celui de l'étude de l'état de la mer. Dans le cadre de mes travaux sur l'évaluation de la ressource éolienne en mer, cette étude a permis de démontrer le bénéfice de ces méthodes. L'objet de cette recherche est la caractérisation des phénomènes de vent à la surface de l'océan afin d'extraire des statistiques de vent à haute résolution spatiale. Ce type d'information est d'importance pour les développeurs de ferme éolienne offshore. Elle leur permet de choisir la zone la plus favorable pour la construction d'une ferme et d'affiner leurs calculs économiques.

Un ensemble d'algorithmes empiriques a été mis au point afin d'évaluer la vitesse et la direction du vent en mer à partir du coefficient de rétrodiffusion de l'onde radar. Ces algorithmes, les CMOD, donnent en fonction de deux de trois paramètres (vitesse, direction, coefficient de rétrodiffusion) le troisième. Le coefficient de rétrodiffusion est fourni par la mesure satellitaire (diffusomètre, ou radar à ouverture synthétique), et le plus souvent, la direction est fournie par des modèles météorologiques, permettant ainsi d'obtenir la vitesse du vent sur la zone. La définition de la direction reste un problème important dans cette application. En effet, si l'on considère la direction comme globalement homogène, on va négliger tous les effets locaux du vent et fournir une information qui ne sera pas précise.

Or, les images radar à ouverture synthétiques (ROS) permettent d'accéder à un "instantané" de la surface marine. Ainsi, on voit apparaître sur la surface marine des phénomènes physiques liés à la mer du vent (petites vagues levées par le vent), les allées de vent ou risées, la houle et toute une combinaison de ces différents phénomènes.

La difficulté de l'étude de l'état de mer réside dans cet enchevêtrement de phénomènes à différentes échelles. Les outils décrits précédemment trouvent dans le cadre de cette étude une application naturelle et pertinente.

La figure 5 présente un exemple d'une image ROS acquise par le satellite ERS dans le golfe du Lion. L'image a été acquise en mode PRI (PRrecision Image). La donnée a été traitée et ré-échantillonnée à la résolution spatiale équivalente de 12,5 m. On peut y voir un bout de la côte (coin inférieur gauche) et une large part de la mer Méditerranée. La zone de mer comporte un ensemble de structures liées à la propagation des vagues vers la côte, à la houle, et à l'effet du vent sur la surface marine et correctement imagées par le ROS⁶.

⁶ Gerling, T.W., 1986. Structure of the surface wind field from the Seasat SAR. *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, N°. C2, pp. 2308-2320.

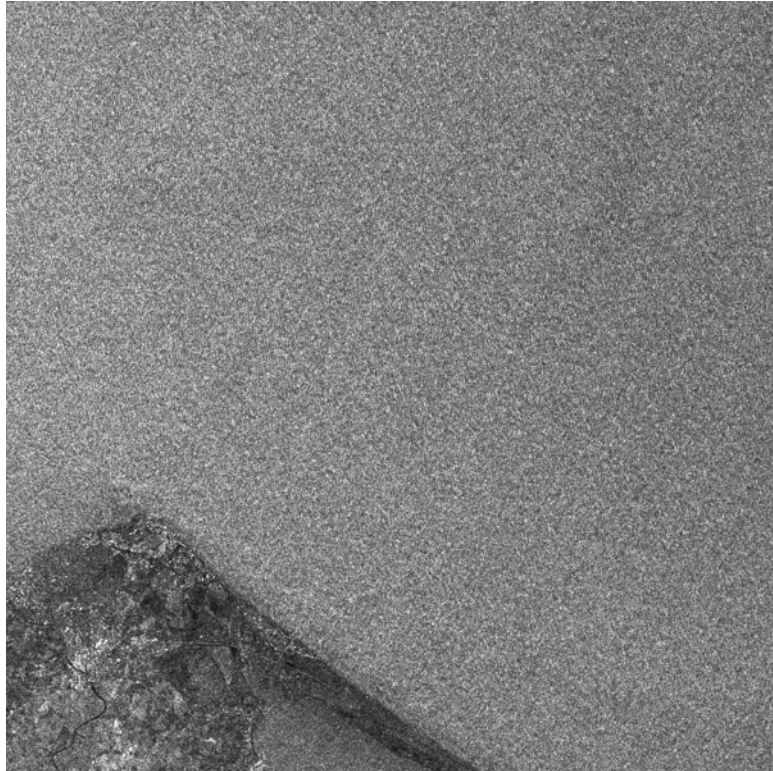


Figure 5. Extrait d'une image ROS en mode PRI du satellite ERS-2 acquise dans le golfe du Lion.

La figure 6 est un extrait de la deuxième image de coefficients d'ondelettes calculée à l'aide de l'algorithme à trous. Elle représente les structures ayant une résolution spatiale comprise entre 25 et 50 m. On peut voir apparaître dans cette image la mer du vent. Ces petites vagues se propagent dans la direction du vent. Ainsi, dans le cas où le signal radar n'est pas déformé par le phénomène de cut-off azimuthal, elles permettent de donner une direction locale du vent et d'obtenir une meilleure représentation de la variation spatiale de cette direction.

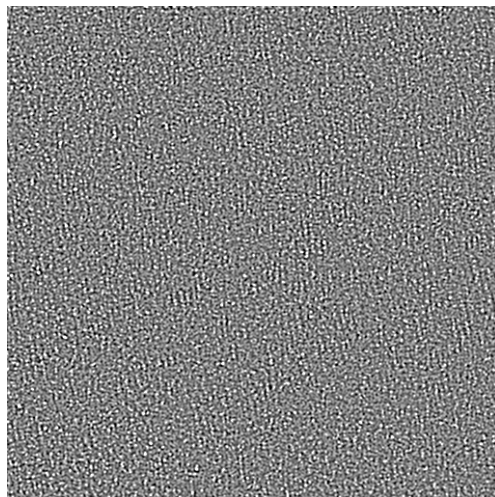


Figure 6. Extrait de la deuxième image de coefficients d'ondelettes représentant les structures comprises entre 25 et 50 m et faisant apparaître la mer du vent.

La figure 7 présente elle, la septième image de coefficients d'ondelettes. Dans cette image, seules les grandes structures sont encore apparentes. Ainsi, on voit nettement apparaître les allées de vent.

Ces allées représentent des sortes de couloir de vent et permettent donc de définir une direction de vent plus globale sur la zone d'intérêt.



Figure 7. Image de coefficients d'ondelettes représentant les structures ayant une résolution spatiale comprise entre 800 et 1600 m.

On obtient donc au travers de cette représentation hiérarchique de l'information, la possibilité de décrire de manière décorrélée, en fonction du choix de la base d'ondelettes, les différents phénomènes physiques présents dans une image de la surface marine. Dans la partie suivante, nous verrons comment utiliser cette représentation pour aboutir à une méthode automatique d'extraction de la direction du vent à haute résolution spatiale.

2.6 Quelques commentaires...

Cette présentation de quelques éléments concernant les représentations basées sur les ondelettes n'est ni novatrice, ni complète. Mes travaux dans ce domaine n'ont pas concernés le développement de nouvelles bases d'ondelettes ou la démonstration de théorèmes. Ces quelques éléments auraient pu être beaucoup plus détaillés et j'aurais pu m'attarder sur la problématique du choix de l'algorithme d'analyse, du choix de la base d'ondelettes et des filtres correspondants, des pas de dilatations en p/q^7 , de l'effet de Gibbs dû à la longueur des filtres, de l'aliasing, etc.

Cependant, j'ai choisi de ne présenter que quelques éléments nécessaires à la compréhension de l'approche utilisée dans mes travaux. Ces méthodes de décomposition espace-échelle sont des outils d'analyse et de traitement performants. En me plaçant dans une optique d'utilisateur, il me semble plus important de m'attacher à présenter l'approche et les idées sous-jacentes.

Mes travaux ont donc porté sur l'utilisation des méthodes pyramidales, des méthodes de représentation redondantes telles que l'algorithme à trous et les pyramides gaussiennes et laplaciennes dans des applications où la combinaison d'une approche mathématique pragmatique et d'une approche physique des phénomènes a permis d'obtenir des résultats pertinents.

⁷Blanc, Ph., T. Blu, T. Ranchin, L. Wald, and R. Aloisi, 1998. Using iterated rational filter banks within the ARSIS concept for producing 10 m Landsat multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 19(12):2331-2343.

La diffusion de ces outils dans la communauté de l'observation de la Terre s'est traduite non seulement par l'écriture d'articles décrivant les concepts et applications, mais aussi au travers d'enseignements dans des formations de 3^{ème} cycle et de cours de formation continue.

La diffusion des résultats de mes recherches a contribué à la vulgarisation de ces outils dans le domaine de l'observation de la Terre. Dans la suite de mes travaux, ils ont contribué à une autre manière d'approcher les problèmes notamment grâce à la description hiérarchique de l'information amenée par ces représentations. De plus, le cadre mathématique précis dans lequel ils ont été définis permet une approche rigoureuse de la modélisation physique et géométrique.

3 Applications et innovations

Mes activités de recherche trouvent leur application dans différentes thématiques. Parmi ces thématiques, j'ai choisi de présenter un peu plus en détail les plus innovantes qui sont la détection de la voirie et la fusion d'images. Puis dans une troisième partie, je présenterais plus succinctement quelques autres innovations

3.1 Extraction de la voirie

3.1.1 Position du problème

L'extraction de la voirie est un thème qui fait partie de mes activités depuis 1995. Il a fait l'objet de deux thèses que j'ai encadrées, l'une soutenue en 1998⁸ et l'autre soutenue en 2003⁹. L'approche retenue dans ce cadre a été de rechercher le développement d'une méthodologie générique et semi-automatique d'extraction de la voirie à partir d'images à haute résolution spatiale.

Le développement et la disponibilité des capteurs à haute résolution spatiale ont permis d'aborder l'étude du milieu urbain. En effet, il faut des résolutions métriques ou sub-métriques pour pouvoir représenter correctement la diversité du milieu urbain. L'accès libre aux archives des satellites russes KVR (résolution spatiale 2 m) puis aux images fournies par les satellites Ikonos et Quickbird ont permis le renouveau de la recherche dans le domaine urbain. Le numéro spécial de Photogrammetric Engineering and Remote Sensing de décembre 2004 illustre bien la vivacité de ce domaine de recherche.

Nous avons donc choisi d'aborder le milieu urbain par l'extraction de la voirie. Un modèle de voirie a été développé lors d'une première thèse et une méthode a été élaborée pour des réseaux simples quadrangulaires. Ces réseaux correspondent en fait à des villes nouvelles ou à des configurations de villes établies sur le modèle nord-américain. La méthode s'appuie sur une approche multi-échelle du problème et fait appel à une hiérarchie de modèles permettant la cartographie des rues dans ce type de ville. Elle a été développée pour des images ayant une résolution spatiale supérieure à 2 m¹⁰ et un ensemble de critères de validation a été proposé.

La deuxième thèse⁹ s'appuie sur les travaux précédents, mais favorise une approche modulaire ayant pour objectif la mise à jour des réseaux. Cette approche modulaire a permis de bien segmenter les différentes étapes de l'extraction de la voirie et de conceptualiser le problème. L'innovation présentée dans ce travail consiste en une combinaison des contours actifs avec une approche de type multi-échelle et la définition de nouveaux contours actifs adaptés à l'extraction de la voirie. Ce travail a aussi permis une réflexion en profondeur sur le problème de l'évaluation de la qualité des résultats¹¹ et de la définition d'une référence permettant l'établissement de critères de qualité¹².

⁸ Couloigner, Isabelle. Reconnaissance de formes dans des images de télédétection du milieu urbain. Thèse de Doctorat " Propagation, Télécommunications, Télédétection ", Université de Nice - Sophia Antipolis, 130 p., 21 septembre 1998.

⁹ Péteri Renaud. Extraction de réseaux de rues en milieu urbain à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale. Thèse de Doctorat " Informatique Temps Réel, Automatique, Robotique ", Ecole des Mines de Paris, 2003 (152 p.)

¹⁰ Couloigner, I. and Ranchin, T., 2000. Mapping of urban areas: a multiresolution modeling approach for semi-automatic extraction of streets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66, n° 7, July 2000, pp. 867-874.

¹¹ Péteri R., Couloigner, I. and Ranchin T., 2004. How to assess quantitatively road extracted from high resolution imagery? *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 12 pp. 1449-1456..

¹² Péteri, R. et Ranchin T., 2003. Evaluation quantitative de méthodes d'extraction de rues : choix d'une référence. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection* n°170 (2003-2), pp. 23-29

3.1.2 Modélisation surfacique de la voirie : approche pixel

L'extraction de la voirie dans les images de télédétection n'est pas un domaine de recherche nouveau. En effet, les premiers travaux basés sur des outils génériques de traitement d'images sont apparus à la fin des années 80¹³. Ces travaux combinaient deux types de traitements, l'extraction des lignes et le suivi de routes. La plupart des travaux était appliqué à l'extraction linéique des routes en milieu rural ou semi-rural et était basé sur des modèles simples de rues. Ces modèles, communs à différents auteurs, ont des propriétés communes : radiométrie le long des routes relativement homogène, et présentant un contraste important avec son voisinage direct.

La mise à disponibilité d'images des satellites russes de résolution proche de deux mètres au milieu des années 90, puis des satellites civils à haute résolution spatiale a permis d'ouvrir le domaine de l'extraction surfacique de la voirie en milieu urbain. L'apport de la haute résolution spatiale pour la cartographie urbaine est indéniable¹⁴, cependant cet accroissement de résolution s'accompagne de la mise en évidence de phénomènes qui perturbent le traitement numérique de l'image comme les ombres, les arbres le long des rues ou les véhicules sur l'asphalte. Afin d'éviter ces perturbations, des approches multi-échelle ont été proposées^{15,16,17}. Elles permettent aussi une modélisation hiérarchique des rues en zone urbaine permettant de définir un modèle de rues un peu plus complexe que ceux précédemment utilisés. C'est une telle approche que nous avons retenue en définissant des classes de rues liées au réseau de rues de type quadrangulaire que l'on trouve dans les villes nouvelles ou de type nord-américain. Quatre classes de rues ont été définies : des rues simples (classe 4), des rues secondaires à terre-plein central (classe 3), des rues secondaires à terre plein central et double voies (classe 2) et des autoroutes urbaines avec un terre-plein central et deux terres-pleins secondaires (classe 1).

La méthode proposée^{8, 10} comprend deux étapes :

- l'extraction des deux bords de rues utilisant les approximations de l'image à différentes résolutions spatiales. Les points d'intersections des profils transversaux de la rue sur l'image originale et ses deux premières approximations sont recherchés. Pour cela, l'utilisateur fournit les points d'initialisation (début et sens) et la classe de la rue à extraire. L'algorithme suit ensuite la rue dans une procédure "estimation-recalage" utilisant des profils radiométriques à différentes résolutions spatiales ;
- l'extraction des caractéristiques de la rue en fonction de sa classe d'appartenance. Ce processus itératif s'appuie sur la représentation des détails existants entre les différentes approximations pour localiser les terre-pleins s'ils existent.

La figure 8 est un extrait d'une image KVR-1000 acquise en mars 1991 sur la ville de Jeddah (Arabie Saoudite). Cette image acquise à la résolution de deux mètres présente des exemples des quatre types de rues retenus dans le modèle. La figure 9 et la figure 10 présentent des profils d'une rue de classe 2 dans les approximations et les coefficients d'ondelettes. Ces deux figures illustrent le comportement d'une structure dans les échelles lorsqu'on l'analyse à l'aide d'une représentation

¹³ Destival I., 1987. Recherche automatique de réseaux linéaires sur des images SPOT. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 105, pp. 5-16.

¹⁴ Puissant, A. and Weber, C. 2002. The utility of very high spatial resolution images to identify urban objects. *Geocarto International*, vol. 17, 1: 31-41.

¹⁵ Heipke C., Steger C. and Multhammer R., 1996. A hierarchical approach to automatic road extraction from aerial imagery. In *Integrating photogrammetric techniques with scene analysis and machine vision II* (D.M. McKeown and I.J. Dowman Editors), *Proceedings of SPIE*, n°2486, pp. 222-231.

¹⁶ Baumgartner A., Steger C., Wiedemann C., Mayer H., Eckstein W. and Ebner H., 1996. Update of roads in GIS from aerial imagery: verification and multiresolution extraction. *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, 3, pp. 53-58.

¹⁷ Mayer H. and Steger C., 1996. A new approach for line extraction and its integration in a multi-scale, multi-abstraction-level road extraction system. *LAPR TC7 workshop : methods for extraction and mapping buildings, roads and other man-made structures from images*.

multi-échelles. En effet, une structure, de type bord de rues, existe à différentes échelles caractéristiques. Elle existe dans l'image originale et dans les différentes approximations dont la résolution est inférieure à son échelle propre. Ainsi, sur l'image proposée, la rue de classe 2 est présente sur les approximations à 2, 4, 8 et 16 m. Au dessus de cette valeur, elle n'est plus représentée. En analysant ces différentes approximations, il est donc possible de suivre le bord de rue au travers des échelles. La figure 9 est une illustration de ce procédé. Comme l'ondelette choisie est une ondelette symétrique, la position des différentes structures n'est affectée d'aucune dérive. Sur la figure 9, deux points sont donc remarquables. Il s'agit des points d'intersection des profils multi-échelles. En intégrant le gradient du contour détecté dans la recherche de ces points, on localise précisément le bord de la rue. De manière similaire sur la figure 10, on peut extraire le terre-plein central.



Figure 8. Extrait d'une image KVR-1000 sur la ville de Jeddah (Arabie Saoudite) acquise en mars 1991.

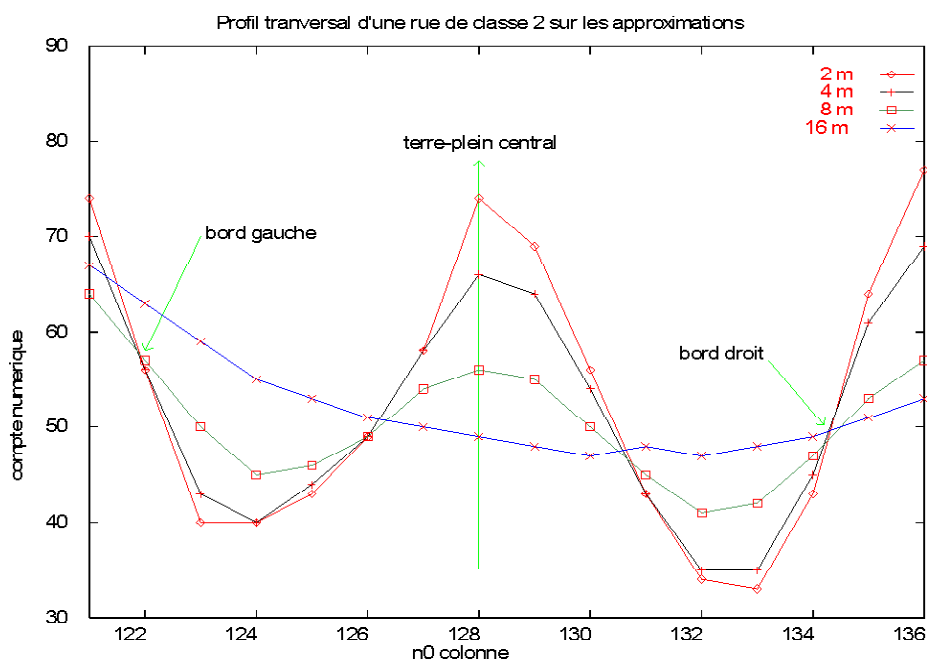


Figure 9. Profil d'une rue de classe 2 sur les approximations

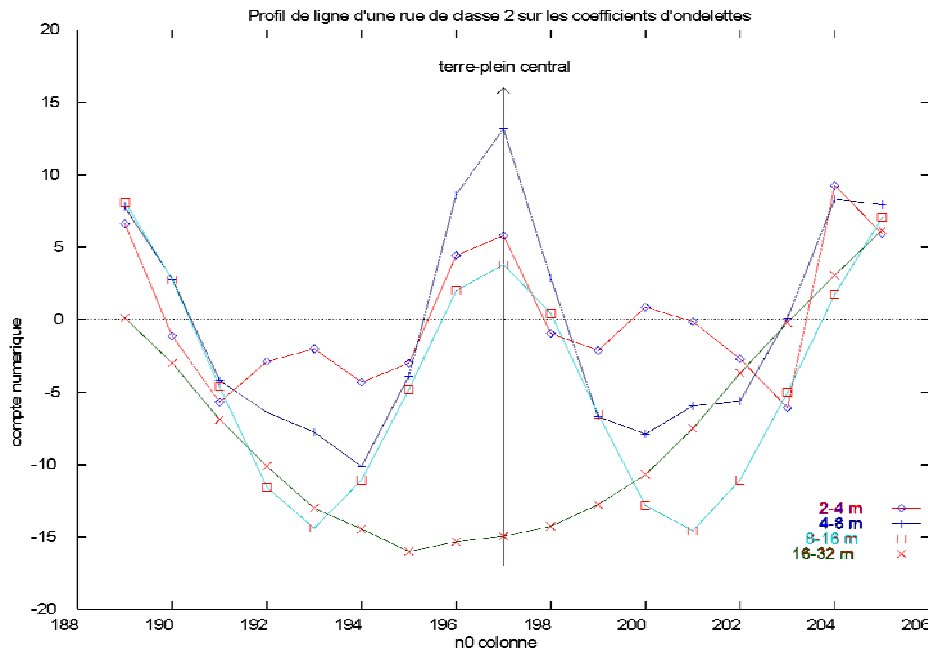


Figure 10. Profil d'une rue de classe 2 sur les coefficients d'ondelettes.

La figure 11 présente le résultat de l'application de la méthode sur la figure 8. Ce résultat est fourni sous forme image et nécessite un traitement supplémentaire pour une intégration dans un système d'information géographique. La précision géométrique de cette méthode est de deux pixels par rapport à une référence définie manuellement, quelle que soit la résolution spatiale des images originales. L'intérêt de cette première approche réside dans l'approche multi-échelle de la problématique et dans l'utilisation d'un modèle. Cependant, elle est très limitative du point de vue des types de réseau extractible, puisque limitée aux réseaux quadrangulaires. De plus, aucune gestion de la topologie n'est réalisée et sa mise en oeuvre nécessite beaucoup d'interventions de la part d'un opérateur et ne permet pas d'obtenir un outil opérationnel. Ceci nous a amené à relancer une thèse sur le sujet.



Figure 11. Résultat de la méthode appliquée à la figure 8. R1 représente une rue de classe 1, R2 et R3 des rues secondaires (classe 2) et R4 une rue de classe 3.

3.1.3 Modélisation surfacique de la voirie : approche vecteur

Les premiers travaux que nous avons réalisés sur l'extraction de la voirie, ont permis de dégager la voie vers l'utilisation des images métriques et sub-métriques. De plus, les lancements du satellite Ikonos en 1999 et du satellite QuickBird en 2001 ont ouvert un accès plus facile à la donnée haute résolution et ont favorisé le développement d'algorithmes adaptés à ces données et la production d'information pour les systèmes d'information géographiques.

3.1.3.1 Description

Le but de nos travaux a été orienté pour fournir une assistance à l'interprète d'images satellitaires lors de la saisie du réseau de rues, ainsi que de caractériser le réseau extrait. La méthode proposée est présentée figure 12 et a été construite de manière modulaire.

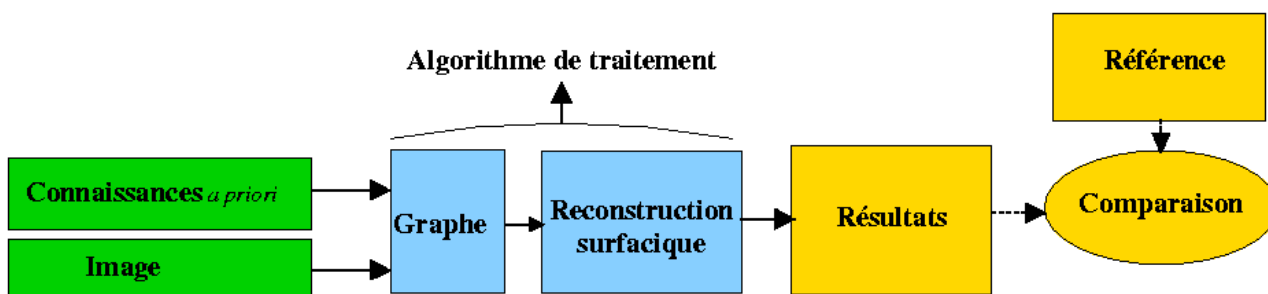


Figure 12. Schéma global de la méthode

Les entrées de l'algorithme, en plus de l'image satellite à très haute résolution, sont des modèles de rues (comme le parallélisme local des bords de rues) et les propriétés topologiques du réseau (comme la connexité). De plus, quatre classes de largeur de rues ont été définies (suivant les spécifications du CETUR¹⁸). L'algorithme de traitement se compose de deux parties séquentielles et exploite la coopération entre la représentation linéique de la rue et sa représentation surfacique. Tout d'abord, un graphe topologiquement correct du réseau de rues est extrait, donnant les relations spatiales entre les différentes rues ainsi qu'une approximation de leur localisation. L'étape suivante est la reconstruction du réseau de rues. Du fait de la très haute résolution spatiale des images utilisées, la rue est reconstruite en tant qu'élément de surface. Cette étape utilise le résultat de l'extraction du graphe du réseau comme initialisation. Une référence, basée sur l'interprétation d'image, permet d'évaluer quantitativement le résultat final. Les différents modules de la méthode sont décrits dans les paragraphes suivants.

3.1.3.2 Module du graphe

Il s'agit dans cette phase d'extraire un graphe topologiquement correct du réseau de rues. Le module du graphe comprend deux phases.

L'extraction des polylignes du graphe est basée sur l'algorithme de suivi de lignes¹⁹. Ce module nous a été gracieusement fourni par l'IGN dans le cadre de la collaboration mise en place pour la thèse de Renaud Pétéri. Cet algorithme est semi-automatique au niveau de l'amorce du suivi,

¹⁸ Centre d'Études des Transports URbains, 8 avenue Aristide Briand 92220 Bagneux, France, « Guide général de la voirie urbaine : Conception, Aménagement, Exploitation », 1988.

¹⁹ Airault S., Jamet O., 1995. Détection et restitution automatique du réseau routier sur des images aériennes, *Traitement du Signal*, vol. 12, no 2, p. 189-200.

l'opérateur fournissant un point et une direction de propagation. Le principe de l'algorithme de suivi est de générer un arbre de recherche de chemins possibles, puis de sélectionner le meilleur chemin, correspondant à la rue à détecter, qui minimise une fonction de coût. Cette fonction de coût évalue l'homogénéité de la texture locale dans les directions de propagation possibles. Cette homogénéité de texture se traduit par une variance minimale dans la direction correspondant à l'orientation de la rue. La robustesse de l'algorithme est assurée par une optimisation du critère d'homogénéité directionnelle sur une distance assez grande (la profondeur de l'arbre de recherche). Le graphe complet par raccordement des polygones extraites est ensuite obtenu de la manière suivante. Une rue est définie d'une intersection à une autre et est représentée dans le graphe du réseau par une polygones. Les rues se connectent entre elles aux intersections, et définissent les nœuds du graphe. De par leur différence de forme et de topologie, les rues et les intersections doivent être traitées séparément, tant pour leur détection que pour leur extraction. Un cercle d'intersection, défini par l'opérateur et représenté sur la figure 13, va délimiter les deux types de traitement à effectuer : traitement des tronçons à contours parallèles et traitement des intersections. Son diamètre est tel qu'il englobe la totalité de l'intersection. Son centre sera le nœud du graphe définissant une intersection.

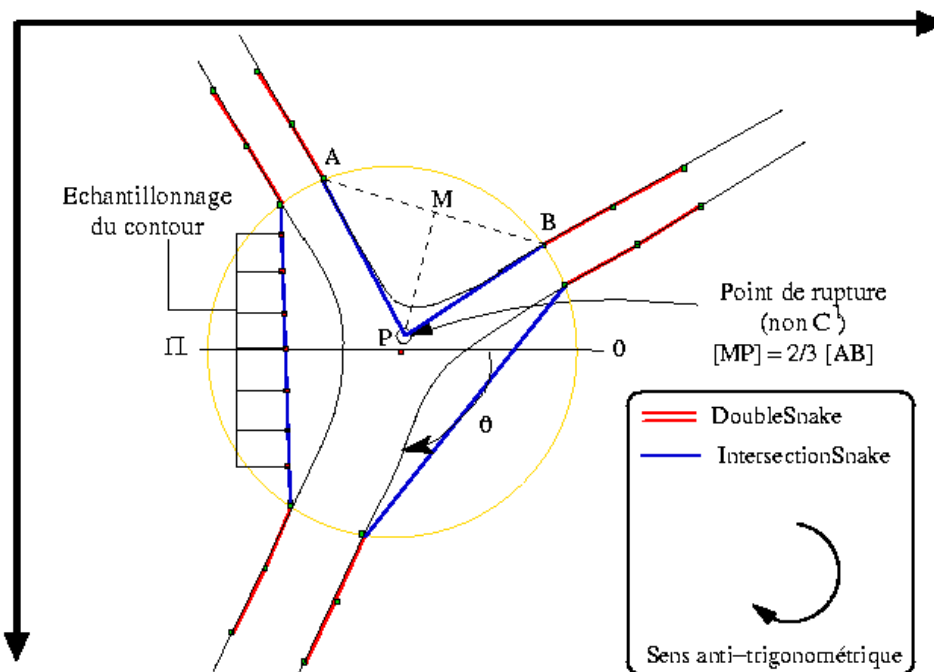


Figure 13. Initialisation des contours actifs d'intersection

La topologie du graphe du réseau sera reconstruite à partir des différentes polygones, non connectées, obtenues par l'algorithme de suivi. Les polygones sont alors raccordées aux centres des cercles d'intersection qu'elles traversent. Après cette étape, le graphe extrait est topologiquement correct mais les différentes polygones ne sont pas nécessairement bien recalées et le réseau n'est représenté que de manière linéique. A partir du graphe extrait, les polygones sont alors échantillonnées et propagées suivant la direction de leur normale afin d'initialiser le module de reconstruction surfacique.

3.1.3.3 Module de Reconstruction

Le but de ce module est d'extraire les rues comme des éléments de surface à partir du graphe fourni à l'étape précédente. Ce module fait intervenir des contours actifs spécifiques (snakes) combinés

avec une analyse multi-échelle. Les contours actifs²⁰ sont des modèles déformables qui permettent d'introduire des connaissances a priori sur l'objet à extraire. L'utilisation combinée de l'analyse multi-échelle va permettre d'augmenter la robustesse de l'algorithme en réduisant l'effet du bruit (véhicules, marquage au sol, . . .).

Deux étapes séquentielles composent cette phase de reconstruction : l'extraction des tronçons de rues avec des bords parallèles et l'extraction des intersections de rues.

C'est le cercle d'intersection qui constitue la frontière entre les deux étapes.

Afin d'extraire les portions de rues à bords parallèles, un nouvel objet a été défini: le DoubleSnake. Il est composé de deux contours actifs ouverts (appelés brins) possédant les contraintes d'évolution des contours actifs simples, tout en interagissant pour garder un parallélisme local entre eux. Un nouveau terme d'énergie $E_{//}$ a été introduit afin de prendre en compte la notion de parallélisme entre ces deux brins. De plus, ses extrémités sont contraintes de minimiser leur énergie en restant sur le cercle d'intersection (figure 13).

La fonctionnelle d'énergie contrôlant l'évolution du DoubleSnake est définie comme:

$$E_j = \sum_i \left[\alpha^i E_{cont}^i + \beta^i E_{curv}^i + \gamma^i E_{2^j image}^i + \delta^i E_{//}^i \right]$$

où i représentent le point i d'un des brins. E_{cont}^i et E_{curv}^i sont des énergies internes qui contrôlent la forme du DoubleSnake.

Une attention particulière est portée au terme d'énergie image $E_{2^j image}^i$, car c'est ce terme qui va attirer le DoubleSnake vers l'objet à extraire. La transformée en ondelettes permet d'obtenir une représentation multi-échelle des contours d'une image²¹. L'énergie image est alors calculée à différentes échelles j , en utilisant les coefficients de la transformée en ondelettes :

$$E_{2^j image}^i = -\sqrt{|W_{2^j}^1 f(i)|^2 + |W_{2^j}^2 f(i)|^2}$$

avec $W_{2^j}^{1,2} f(i)$ les coordonnées de la transformée en ondelettes à l'échelle j .

Le traitement des intersections intervient une fois que la phase d'extraction des contours parallèles est terminée. Le contour actif utilisé (IntersectionSnake) au cours de cette étape consiste en un contour ouvert. Il est initialisé en reliant par des segments les extrémités des DoubleSnakes puis est échantillonné. Un point intermédiaire de «rupture» est introduit par l'algorithme si l'angle Θ entre deux extrémités est inférieur à $\frac{3\pi}{5}$ (voir figure 13).

3.1.3.4 Déroulement de l'algorithme de reconstruction

La figure 14 représente le déroulement de l'algorithme de reconstruction à partir du graphe du réseau. A partir de l'image à la résolution originale, une analyse multi-échelle est effectuée, décomposant hiérarchiquement l'image en une série de plans de contexte et une série de plans d'ondelettes²². Les DoubleSnakes évoluent sur tous les plans de contexte successifs, de la résolution la plus basse fixée par la classe de la rue, jusqu'à l'image de résolution initiale. Pour chaque plan de contexte, une énergie image est calculée à partir du plan d'ondelettes associé. Cette énergie va attirer les contours actifs vers les détails présents à la résolution du plan de contexte considéré.

²⁰ Kass M., Witkin A., Terzopoulos D., 1987. Snakes : Active Contour Models, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision*, London, United Kingdom, p. 259–268.

²¹ Mallat S., Zhong S., 1992. Characterization of Signals from Multiscale Edges, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 40, no 7, p. 2464–2482.

²² Mallat S., 1997. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, AP Professional, London, United Kingdom, 577 pages.

Une fois que les DoubleSnakes ont tous minimisé leur énergie, les IntersectionSnakes sont initialisés et leur extraction s'effectue dans le même processus multi-échelle. Deux contraintes s'ajoutent lors de leur évolution : les extrémités sont fixes et le contour actif est contraint à ne jamais sortir du cercle d'intersection. A la fin des différentes itérations, tous les contours actifs se trouvent alors dans un état d'équilibre.

L'algorithme de traitement a la particularité d'utiliser les deux modes de représentation des rues : la représentation linéique et la représentation surfacique. La séparation du traitement permet aussi à l'utilisateur d'effectuer une vérification intermédiaire, et si nécessaire une correction, entre la phase d'extraction du graphe du réseau et la phase de reconstruction. On vise ainsi un contrôle continu de la qualité d'extraction.

Si nous proposons des algorithmes pour ces deux modules, on peut aussi envisager l'utilisation d'autres méthodes pour chacune des étapes. Par exemple, on peut inclure pour l'étape du graphe, tout algorithme permettant une extraction linéique du réseau, quitte à diminuer artificiellement la résolution de l'image. La méthode est ainsi ouverte aux développements futurs.

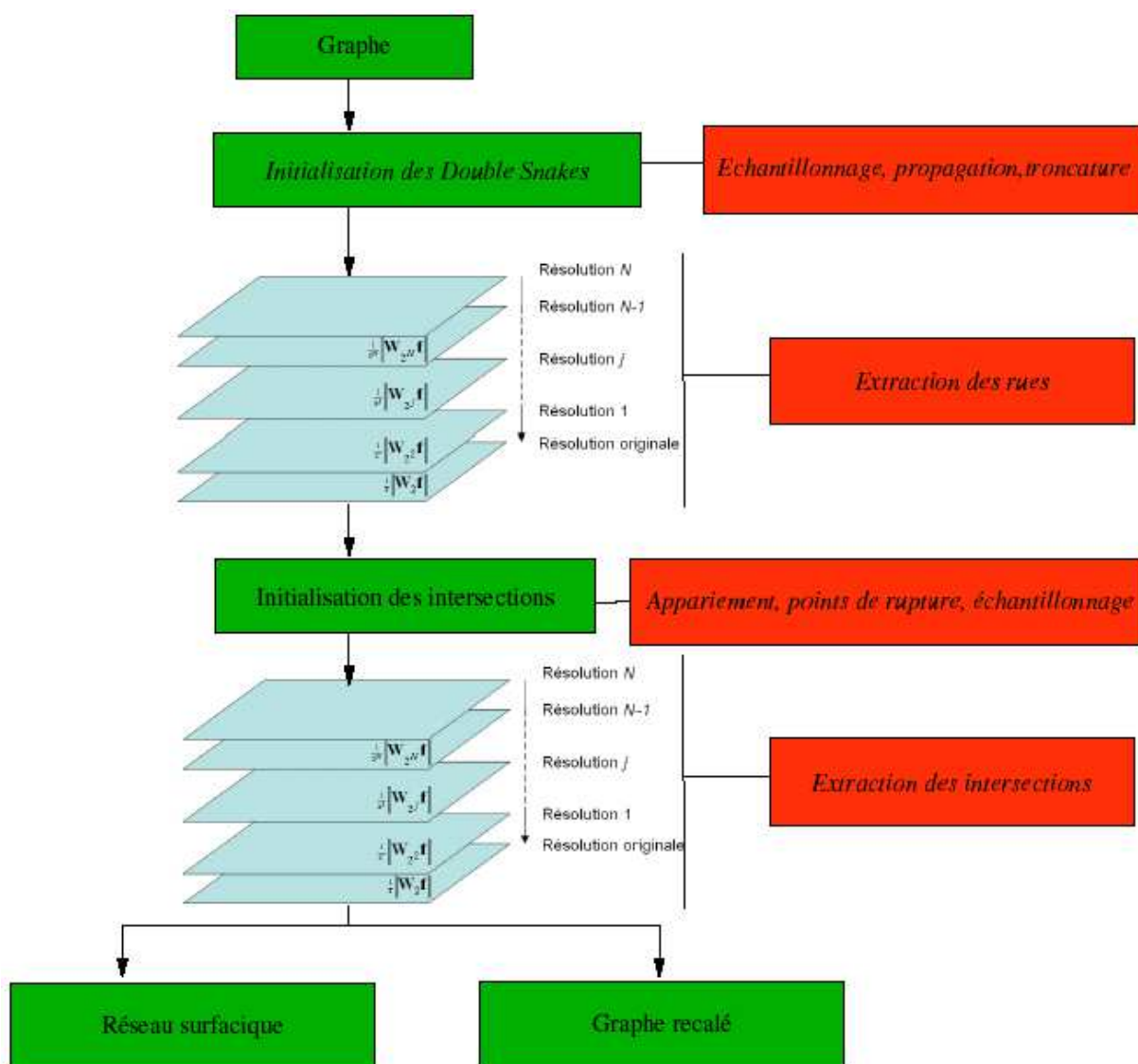


Figure 14. Algorithme de reconstruction surfacique

3.1.4 Exemple

La scène suivante provient du satellite Quickbird de la société DigitalGlobe. Ce satellite acquiert des images en mode panchromatique à 0,61 m. L'image présentée a été rééchantillonnée à 70 cm. Cette image présentée figure 15, a été acquise le 31 août 2002 au dessus de la ville de Fredericton au Canada. La ville de Fredericton est typique des villes nord-américaines, où le réseau de rues est quadrangulaire.



Figure 15. Image Quickbird du centre ville de Fredericton, Canada © DigitalGlobe

On peut noter la présence d'artefacts sur la chaussée, comme des véhicules ou le marquage au sol (cas des rues 6 et 9 notamment). Il y a aussi un grand nombre d'occlusions partielles des rues, principalement les arbres et les ombres portées des bâtiments (rue 2, 3, 5 et 10). Enfin, il y a quatre intersections, trois en «X» et une en «Y» (entre les rues 5, 7 et 8).



Figure 16. Résultat final

Grâce à l'utilisation des différents plans d'ondelettes, l'algorithme montre une bonne robustesse vis-à-vis du bruit sur la chaussée comme les véhicules (cas des rues 7 ou 9) ou le marquage au sol (rue 9). Il a aussi réussi à passer plusieurs occlusions causées par les arbres (rue 2) ou les ombres portées (rues 3, 6, et 7).

Certains tronçons ont été moins bien extraits : aux abords de l'intersection avec les rues 1, 10 et 9, les bords de la rue 2 s'écartent progressivement. Ceci est dû à la présence du parking et de nombreuses occlusions. Pour la rue 11, l'initialisation loin de l'axe de la rue associée avec le grand nombre d'ombres portées ont fait «dériver» le DoubleSnake, qui a toutefois gardé une largeur correcte. Pour les intersections, certaines sont un peu «coupées» alors que d'autres ont été extraites correctement. La méthode développée pour l'extraction des carrefours est relativement primaire par rapport aux travaux effectués dans ce cadre à l'IGN²³.

3.1.5 Modélisation surfacique de la voirie: conclusions

La méthode globale d'extraction des réseaux de rues en milieu urbain à partir des images à très haute résolution spatiale proposée, répond à la forte demande dans la création et la mise à jour automatisée de cartes. Cette méthode d'extraction est modulaire, et exploite la coopération entre une représentation surfacique de la rue (module du graphe) et une représentation surfacique (module de reconstruction). Son application et son évaluation dans de nombreux cas ont permis de montrer son bon comportement, même en présence d'artefacts sur la chaussée. Même s'il conviendrait de tester la méthode dans un contexte opérationnel pur pour étudier ses limites et la sensibilité aux paramètres, l'algorithme permet un gain de temps significatif pour l'opérateur (d'un facteur entre 6 et 10 suivant la complexité de la scène).

De plus, ces travaux ont été complétés par une travail en profondeur sur le type de référence nécessaire à l'évaluation de la qualité des méthodes d'extraction d'objets dans les images satellites¹² et sur les paramètres quantitatifs pour évaluer la qualité des routes extraites¹¹.

²³ Boichis N., 2000. Extraction automatique des carrefours routiers par interprétation d'images aérienne guidée par une base de données cartographiques, Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, France, 142 pages.

3.1.6 Conclusions et Perspectives

Ces travaux sur l'extraction de la voirie ont permis d'avancer grandement sur la compréhension et la modélisation des phénomènes multi-échelles dans les images d'observation de la Terre. Ainsi, nous avons pu dans ce cadre apprécier l'apport des modèles et leurs limites, ainsi que l'impact des représentations sur les résultats des méthodes.

Concernant les derniers travaux réalisés, un des avantages de la méthode développée est de n'utiliser que très peu de sources d'information. Cependant, sa modularité permet l'incorporation de données externes. Par exemple, l'intégration des travaux de l'IGN²³, qui propose une extraction précise à partir d'une base de données des différents types d'intersection, rond-points compris, pourrait être bénéfique. L'information d'élévation, c'est à dire la hauteur évaluée en chaque pixel, permettrait de lever certaines incertitudes. On pourrait envisager son utilisation à la fin de l'extraction pour distinguer le haut des bâtiments du bord de la chaussée. L'utilisation de plusieurs canaux spectraux pourrait aussi améliorer les résultats d'extraction. Ainsi, l'indice de végétation peut permettre de masquer les arbres le long des rues et restreindre ainsi la zone d'extraction. Les images thermiques peuvent fournir des indications sur les véhicules en mouvement circulant sur la chaussée, et donc sur la présence de la rue. Dans un cadre d'usage opérationnel de cette méthode, il faudra veiller toutefois à ce que l'introduction de ces données externes n'augmente pas la complexité et le temps de traitement de manière trop importante, et que le gain de précision et de fiabilité soit en accord avec les besoins opérationnels.

3.2 Fusion d'images : le concept ARSIS

3.2.1 Introduction

La plupart des satellites optiques d'observation de la Terre porte des capteurs à différentes résolutions spatiale et spectrale. La configuration de ces capteurs et leur performance sont liées aux limitations techniques telles que la capacité d'enregistrement à bord, le débit des canaux de transmission des données, l'optique des capteurs, ... Ainsi, depuis les premiers satellites, les données disponibles comprennent le plus souvent un ensemble d'images multispectrales à basse résolution spatiale et une image panchromatique à haute résolution spatiale. La haute résolution spatiale permet une description fine des formes, éléments et structures. Le comportement physique des différents objets est mieux identifié si la haute résolution spectrale est employée. L'idéal pour l'utilisateur de ces données serait de disposer d'images qui soient à la fois à haute résolution spatiale et à haute résolution spectrale.

Le besoin d'un produit de fusion combinant les hautes résolutions spatiale et spectrale a été exprimé par les utilisateurs. De nombreux algorithmes existent et ont été revus par Pohl et Van Genderen²⁴ ou Wald²⁵. Le problème général consiste en la définition d'une solution permettant de générer des données, ayant la plus haute résolution spatiale disponible dans l'ensemble des données, aussi proches que possible de celles que délivrerait le capteur s'il avait la plus haute résolution spatiale. Mes premiers travaux ont concerné le développement d'algorithmes de fusion d'images pour les satellites SPOT et leur comparaison avec les algorithmes les plus performants disponibles. Cette démarche a nécessité le développement d'un protocole d'évaluation de la qualité des produits de fusion²⁶. Ce dernier m'a permis de prendre conscience de la difficulté d'évaluation des résultats d'algorithmes et m'a aidé à mieux formuler le problème général de la fusion d'images, objet de cette recherche.

Ces réflexions nous ont permis à Lucien Wald et moi-même, de dépasser le simple cadre de la mise en oeuvre algorithmique et de proposer le concept ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures). Ce concept a permis de représenter la plupart des méthodes, faisant appel à des approches multi-échelles, publiées. De plus, cette formalisation nous a permis de comprendre sur quels points devaient porter nos efforts de recherche. Nous avons, par exemple, effectué un travail spécifique sur des filtres permettant de prendre en compte des rapports de résolution autres que dyadiques⁷.

Comme pour l'extraction de la voirie, la disponibilité des images à résolution métrique et sub-métrique a relancé de nouvelles recherches dans le domaine de la fusion afin de prendre en compte l'impact de la très haute résolution spatiale et les nouveaux besoins des utilisateurs. Ainsi, de nouveaux algorithmes ont été explorés dans le cadre du concept et appliqués aux images des satellites Ikonos et Quickbird. De plus, les propriétés des produits de fusion ont été reformulées grâce au groupe de travail "Data Fusion" de l'European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL) et de la Société des Electriciens et Electroniciens de France (SEE), afin de proposer une version améliorée du protocole commun d'évaluation de la qualité²⁷.

²⁴ Pohl C., van Genderen J. L., 1998, Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), 823-854.

²⁵ Wald L., 2002, Data fusion: definitions and architectures – fusion of images of different spatial resolutions. Les Presses, Ecole des Mines de Paris, Paris, France, ISBN 2-911762-38-X, 200 p.

²⁶ Wald, L., Ranchin, T. and Mangolini, M., 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63, 6, pp. 691-699.

²⁷ Thomas, C. and Wald, L., 2004. Assessment of the quality of fused products. In *Proceedings of the 24th EARSeL Symposium*, Dubrovnik, Croatia, 25-27 May 2004.

3.2.2 Conceptualisation du problème

On définit A_h l'image à haute résolution spatiale, B_l l'image multispectrale, h la résolution spatiale originale de A et l la résolution spatiale originale de B ($l < h$). On cherche donc à construire des images synthétiques B^*_h proches de la réalité.

Le concept ARSIS a été défini de manière générique, quels que soient les outils mathématiques utilisés pour son implémentation. L'approche n'est certes pas nouvelle, mais n'a jamais été exprimée comme un concept avant le travail commun de l'Ecole des Mines de Paris et d'Aérospatiale²⁸.

Le concept ARSIS utilise une méthode multi-échelle pour la description et la modélisation de l'information manquante entre les images A_h et B_l . La méthode multi-échelle la plus utilisée pour son implémentation est l'analyse multirésolution utilisée de manière conjointe avec la transformée en ondelettes. D'autres outils existent : des bancs de filtres itératifs à la place de la transformée en ondelettes⁷, des filtres gaussiens²⁹, la méthode HPF définit ses propres filtres³⁰, des pyramides laplaciennes³¹,...

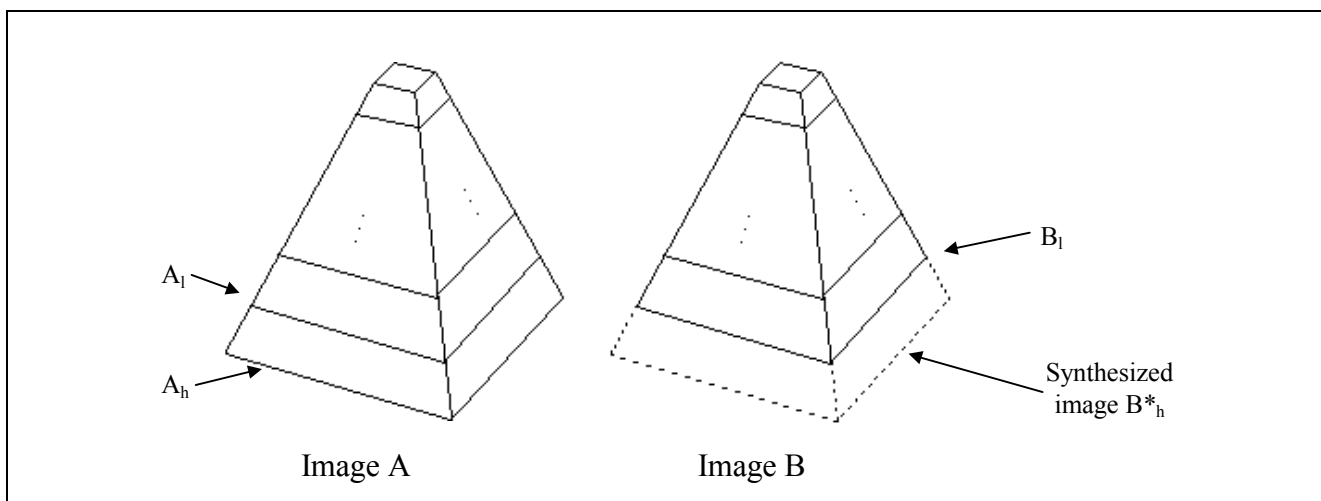


Figure 17. Utilisation d'une approche pyramidale pour la fusion d'images à haute résolution, spatiale et spectrale dans le concept ARSIS.

Une méthode multi-échelle est appliquée aux deux images A et B . Une description, à chaque échelle, de l'information contenue dans chacune des images est obtenue. L'information manquante (les hautes fréquences de l'image) entre A_h et B_l , représentée par les coefficients d'ondelettes, est extraite et utilisée pour la construction de l'image synthétique B^*_h . La figure 17 illustre cette approche dans le cas d'une description pyramidale de l'information. L'information manquante dans la pyramide B et devant y être injectée se situe dans la partie basse manquante de la pyramide B . C'est seulement cette information qui est nécessaire pour synthétiser l'image B^*_h . Si l'on translate le bas de la pyramide A directement dans la pyramide B et que l'on reconstruit l'image synthétique B^*_h ,

²⁸ Ranchin, T. and Wald, L., 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 1, pp.49-61.

²⁹ Tom, V. T., 1987. System for and method of enhancing images using a multiband information. USA Patent 4,683,496, July 28.

³⁰ Chavez, P. S. Jr., S. C. Sides, and J. A. Anderson, 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3):265-303.

³¹ Aiazzi, B., L. Alparone, S. Baronti, I. Pippi, 1999. Fusion of 18m MOMS-2P and 30m Landsat TM multi-spectral data by the generalized Laplacian pyramid. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, no. 7-4-3W6, pp. 116-122, Special Issue on EARSeL Workshop, Valladolid, Spain 3-4 June 1999.

elle ne sera pas équivalente à "ce que devrait voir le capteur B s'il avait la résolution spatiale du capteur A ". Afin d'améliorer la qualité des images synthétiques, une transformation de l'information fournie par la représentation multi-échelle de l'image A en information nécessaire à la synthèse de l'image B , doit être effectuée.

La figure 18 présente le schéma général d'application du concept ARSIS. La première étape consiste en l'application d'un modèle de description hiérarchique, de modélisation et de synthèse des structures. Ce modèle permet de calculer des approximations de l'image A ainsi que de décrire hiérarchiquement les structures (aussi appelées détails) existantes dans l'image (étape 1 de la figure 18). Le modèle utilisé doit aussi permettre de reconstruire l'image sans perte d'information. Ce modèle est appelé MSM (MultiScale Model). La même opération est appliquée à l'image B (étape 2).

Cette description hiérarchique des structures fournie par chaque décomposition est utilisée pour ajuster les paramètres d'un modèle reliant les structures connues des ensembles A et B (étape 3). De nombreuses solutions existent pour ce modèle, appelé IBSM (Inter Band Structures Model) sur la figure 18.

De ce modèle est dérivé un autre modèle, appelé HRISBM (High Resolution Inter Band Structures Model), permettant de convertir les structures connues des ensembles A et B en structures recherchées de l'image B (étape 4). Finalement, l'inversion de la méthode de description hiérarchique des structures de l'image permet la synthèse de l'image B^*_h avec la résolution spatiale de l'image A (étape 5).

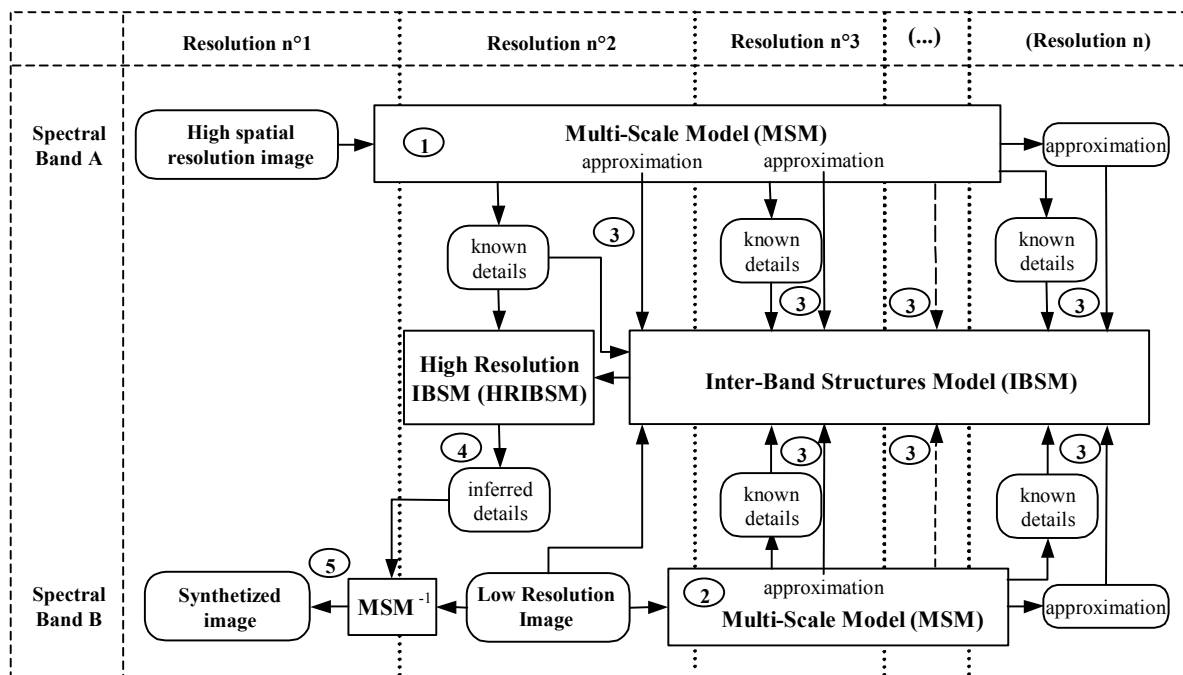


Figure 18. Schéma général d'application du concept ARSIS utilisant une méthode multi-échelle (MSM). Voir le texte pour plus de commentaires.

De ce concept, de nombreuses implémentations sont dérivables³². Ce concept a été appliqué à différentes configurations de satellites pour des résolutions spatiales variées, avec des écarts de

³² Ranchin T., Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Wald L., 2003. Image fusion. The ARSIS concept and some successful implementation schemes. Accepted by *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* – December 2002

résolution spatiale compris entre 2 et 10, et avec des cas d'applications allant de l'utilisation des images synthétiques dans le domaine de l'agriculture jusqu'au domaine urbain.

3.2.2.1 Le modèle MSM

Le modèle MSM le plus utilisé pour l'implémentation du concept ARSIS est l'analyse multirésolution utilisée de manière conjointe avec la transformée en ondelettes. De nombreux auteurs^{28,33} utilisent une analyse multirésolution associée à une transformée en ondelettes telles que les a proposé Mallat³. D'autres^{32,34} proposent l'utilisation de transformée en ondelettes telle que proposée par Dutilleul⁵, appelée ici transformée en ondelettes non décimée.

Dans nos premiers travaux, la fusion des images SPOT panchromatique (10 m) et multispectrales (20 m), le modèle MSM utilisé est celui proposé par Mallat³. Le rapport de résolution entre les images à fusionner est de deux, et les résolutions spatiales sont décimétriques. L'algorithme de Mallat utilisant des ondelettes orthogonales de Daubechies² qui permettent une décorrélation des différentes échelles, a fourni pour ce cas les meilleurs résultats possibles. Cependant, l'asymétrie des filtres utilisés entraîne un décalage d'un demi-pixel par itération. Ce décalage est aisément compensable par un recalage fin des images ou par l'utilisation de filtres bi-orthogonaux qui sont symétriques.

Lorsque l'algorithme de Mallat est appliqué aux images métriques et submétriques, son impact sur la qualité visuelle des produits de fusion devient très important. C'est ce constat, réalisé sur un grand nombre de cas, qui nous a amené à utiliser les transformées en ondelettes non décimées comme modèle MSM.

D'autres outils existent. Les pyramides laplaciennes proposées par Burt et Adelson⁴ peuvent être utilisées pour la description hiérarchique de l'information, Tom²⁹ a utilisé des pyramides gaussiennes, Chavez *et al.*³⁰ ont défini des filtres dans leur méthode HPF, Blanc *et al.*⁷ ont utilisé des bancs de filtres itératifs à la place de la transformée en ondelettes. Aiazzi *et al.*^{35,36} ou Ranchin *et al.*³² proposent l'utilisation de pyramides laplaciennes généralisées. D'autres solutions existent comme les pyramides morphologiques³⁷, ou les transformations de Fourier.

3.2.2.2 Le modèle IBSM

Moins nombreuses sont les solutions pour le modèle appelé IBSM (Inter Band Structures Model) sur la figure 18. L'établissement de ce modèle est basé sur l'exploration des transformations entre les échelles des différentes bandes spectrales. Le choix du MSM sur ce modèle n'est pas négligeable, mais reste difficile à évaluer.

³³ Garguet-Duport, B., J. Girel, J.-M. Chassery, et G. Pautou, 1996. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9):1057-1066. Yocky, D. A., 1996. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT panchromatic data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), pp. 1067-1074.

³⁴ Nuñez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Palà V. et Arbiol R., 1999, Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3):1204-1211.

³⁵ Aiazzi, B., L. Alparone, S. Baronti, et I. Pippi, 1999. Fusion of 18m MOMS-2P and 30m Landsat TM multi-spectral data by the generalized Laplacian pyramid. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, no. 7-4-3W6, pp. 116-122, Special Issue on EARSeL Workshop, Valladolid, Spain 3-4 June 1999.

³⁶ Aiazzi, B.; Alparone, L.; Baronti, S. et; Garzelli, A., 2002. Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 10, pp. 2300- 2312.

³⁷ Laporterie, F., 2002. Représentation hiérarchiques d'images avec des pyramides morphologiques. Application à l'analyse et à la fusion spatio-temporelle de données en observation de la Terre. Thèse de doctorat en traitement d'images et télédétection, Ecole Nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, 178 p.

Ranchin et Wald²⁸ ont proposé trois modèles de transformations globaux appelé modèle 1, modèle 2 et modèle 3, et s'appliquant sur les images de détails. Le modèle 1 (M1) est un modèle identité. Les détails recherchés de l'image B sont identifiés aux détails correspondants connus de l'image A. Le modèle 2 (M2) correspond à un ajustement de la moyenne et de la variance des deux distributions des structures de A et B à la résolution n°3 (figure 18). De manière similaire, le modèle 3 (M3) utilise la méthode des moindres carrés ou de l'axe d'inertie pour cet ajustement.

Ranchin *et al.*³² décrivent deux modèles IBSM locaux. Le premier (RWM) décrit les transformations locales entre les descriptions des structures A et B fournies par le modèle MSM à la résolution n° 3 (figure 1). Ce modèle a été proposé par Ranchin *et al.*³⁸ et porte les initiales de ses auteurs. De même pour le modèle AABP³⁶ qui fonctionne de manière similaire, mais s'applique aux approximations fournies par le modèle MSM.

3.2.2.3 Le modèle HRIBSM

Le choix de ce dernier modèle, appelé HRISBM (High Resolution Inter Band Structures Model), n'est pas trivial. L'influence du changement de résolution spatiale sur l'information extraite de l'imagerie satellite est connue sans être pour autant bien modélisée. Ce modèle cherche donc à rendre compte des transformations inter-échelles. Pour le cas des images SPOT, l'influence de ce modèle est faible. Cependant le passage à la très haute résolution spatiale nécessite de nouvelles réflexions sur ce modèle et sur l'évolution des structures et de la variance inter-échelles. Cette réflexion doit considérer l'influence des seuils de résolutions qui marquent l'apparition ou la disparition de certains types d'objets (voitures, bâtiments, ...) lors d'une description multi-échelles d'une image.

Le modèle HRIBSM est le plus souvent pris identique au modèle ISBM. Ranchin *et al.*³⁸ ont effectué une synthèse multi-échelle de leur modèle IBSM (dans ce cas RWM) de la résolution n°3 à la résolution n°2. Nous avons aussi évalué la combinaison des modèles IBSM et HRIBSM au travers de modèles multi-échelles auto-régressifs (AR) tels que proposés par Basseville *et al.*^{39,40}. Ces derniers travaux, non publiés, ont montré, pour le cas des images SPOT avec l'algorithme de Mallat, que les modèles AR d'ordre 1 donnaient les meilleurs résultats par rapport aux autres modèles AR (ordre 2 et supérieurs) mais étaient moins performants que les autres associations des modèles IBSM et HRIBSM testées.

3.2.3 Exemple

La compagnie GIM nous a aimablement fourni un ensemble d'images Ikonos à des fins de tests. Cet ensemble est composé d'une image panchromatique PAN à la résolution spatiale de 1 m et de quatre bandes multispectrales (MS) à la résolution de 4 m. Les bandes spectrales des différentes images sont données dans la table 1. La zone géographique est la cité de Hasselt en Belgique. Les images ont été acquises simultanément le 28 avril 2000, à 10:39 UTC. Les données originales sont fournies avec une dynamique de 11 bits.

³⁸ Ranchin, T., Wald, L. et Mangolini, M., 1994. Efficient data fusion using wavelet transforms: the case of SPOT satellite images. In Proceedings of SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation. Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing. San Diego, Californie, USA, July 11-16 1993, vol. 2034, pp. 171-178.

³⁹ Basseville, M., Benveniste, A., Willsky, A. S., 1992a, Multiscale autoregressive processes, part I: Schur-Levinson parametrizations. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40, 8, pp. 1915-1934.

⁴⁰ Basseville, M., Benveniste, A., Willsky, A. S., 1992b, Multiscale autoregressive processes, part II: lattice structures for whitening and modeling. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40, 8, pp. 1935-1954.

PAN	Bleu	Vert	Rouge	Proche Infrarouge	
Bande spectrale	450-900	450-520	520-600	630-690	760 – 900

Table 1. Bandes spectrales des images panchromatique (PAN) et multispectrales (MS) en nanomètres.

L'image présentée figure 19 est un extrait de l'image PAN. Une partie de la rivière est visible sur la partie gauche de l'image. Elle est traversée par deux ponts et on peut apercevoir de nombreux bateaux. Une route principale longe cette rivière et de nombreuses voitures sont visibles. Cette zone est principalement une zone industrielle avec de nombreux bâtiments de grande taille entourés d'arbres. Dans le coin supérieur droit de l'image, on peut identifier un stade dont la pelouse est partiellement dégradée. La figure 20 présente un extrait de la même zone acquise dans la bande proche infrarouge (PIR) à la résolution spatiale de 4 m. Cette bande PIR est généralement la plus difficile à synthétiser et illustre bien la qualité d'une méthode.



Figure 19. Extrait de l'image panchromatique à 1 m.



Figure 20. Extrait de l'image Proche Infrarouge (PIR) à 4 m.

Le modèle MSM utilisé est une transformation en ondelettes combinée avec une analyse multirésolution telle que proposée par Dutilleux⁵, appelée ici UWT. Ce choix influence de manière importante le choix des modèles IBSM et HRIBSM puisque les structures sont modélisées comme des variations autour d'une valeur nulle. En particulier, les modèles IBSM et HRIBSM choisis ne devront pas introduire de biais dans la modélisation des structures.

Les quatre méthodes proposées ci-après, ont donc le même modèle MSM, mais combinent des modèles IBSM et HRIBSM différents. Dans ce cas précis de l'imagerie Ikonos, la résolution n°1 correspond à 1 m, taille du pixel de l'image panchromatique (PAN), la résolution n°2 à 2 m, la résolution n°3 à 4 m, taille du pixel des images multispectrales (MS) et la résolution n°4 à 8 m. Si l'on se replace dans la description fournie par la figure 18, où la résolution est définie de manière générique, la résolution n°2 de ce schéma correspond à la résolution n°3 du cas de l'imagerie Ikonos.

La première méthode utilisée est appelée UWT-RWM. Le modèle IBSM utilisé est le modèle RWM. Ce modèle est décrit en détail dans Ranchin *et al.*³². Il est calculé à la résolution n° 4. Le modèle HRIBSM est choisi identique au modèle IBSM, et est appliqué aux résolutions n°2 et n° 3. La deuxième méthode est appelée UWT-ATS3. Elle a été développée dans le cadre de l'action ATS3-E3 du CNES. Elle combine pour le modèle IBSM, les modèles M2 et RWM. Les modèles M2 et RWM se calculent à la résolution n° 4. Le modèle HRIBSM consiste en l'application du modèle RWM à la résolution n°3, puis du modèle M2 à la résolution n°2 accompagné d'un débruitage. Ce débruitage consiste à mettre les structures qui ont une valeur inférieure à un seuil à zéro. Il est inspiré des travaux de Donoho et Johnstone⁴¹ sur le shrinkage.

La troisième méthode est la méthode UWT-M1. Dans ce cas, les modèles IBSM et HRIBSM sont des modèles identité.

La quatrième méthode proposée est appelée UWT-M2. Le modèle IBSM est le modèle M2 calculé à la résolution n° 4. Le modèle HRIBSM est dans ce cas identique au modèle IBSM.

Les images obtenues par l'application des quatre méthodes proposées, sont, elles aussi, en 11 bits. La figure 21a est le résultat de l'application de la méthode UWT-RWM à l'image PIR. Les figures 21b, 21c et 21d résultent respectivement de l'application des méthodes UWT-ATS3, UWT-M1 et UWT-M2. Les tables de contraste de chacune des images sont similaires de manière à pouvoir comparer visuellement les résultats.

La qualité visuelle de chacune des images présentées ci-après est très différente. L'image UWT-RWM (figure 21a) présente peu de piqué. Les objets sont difficilement différenciés. On peut observer parfois un aspect granulaire (par exemple sur le stade). L'image présente un contraste faible et des halos entourent certains objets (par exemple les bateaux ou le stade). L'image UWT-ATS3 (figure 21b) est d'une meilleure qualité visuelle. Les objets sont mieux différenciés. Cependant, la qualité visuelle n'est toujours pas satisfaisante. L'image UWT-M1 (figure 21c) présente une qualité proche de celle de l'image UWT-ATS3, quoiqu'inférieure. L'image UWT-M2 (figure 21d) offre la meilleure définition des objets. Elle permet une meilleure reconnaissance et identification des objets présents dans l'image.

⁴¹ Donoho, D.L. and Johnstone, I.M. 1994. Ideal Spatial Adaptation via Wavelet Shrinkage. *Biometrika*, 81, pp. 425 - 455.

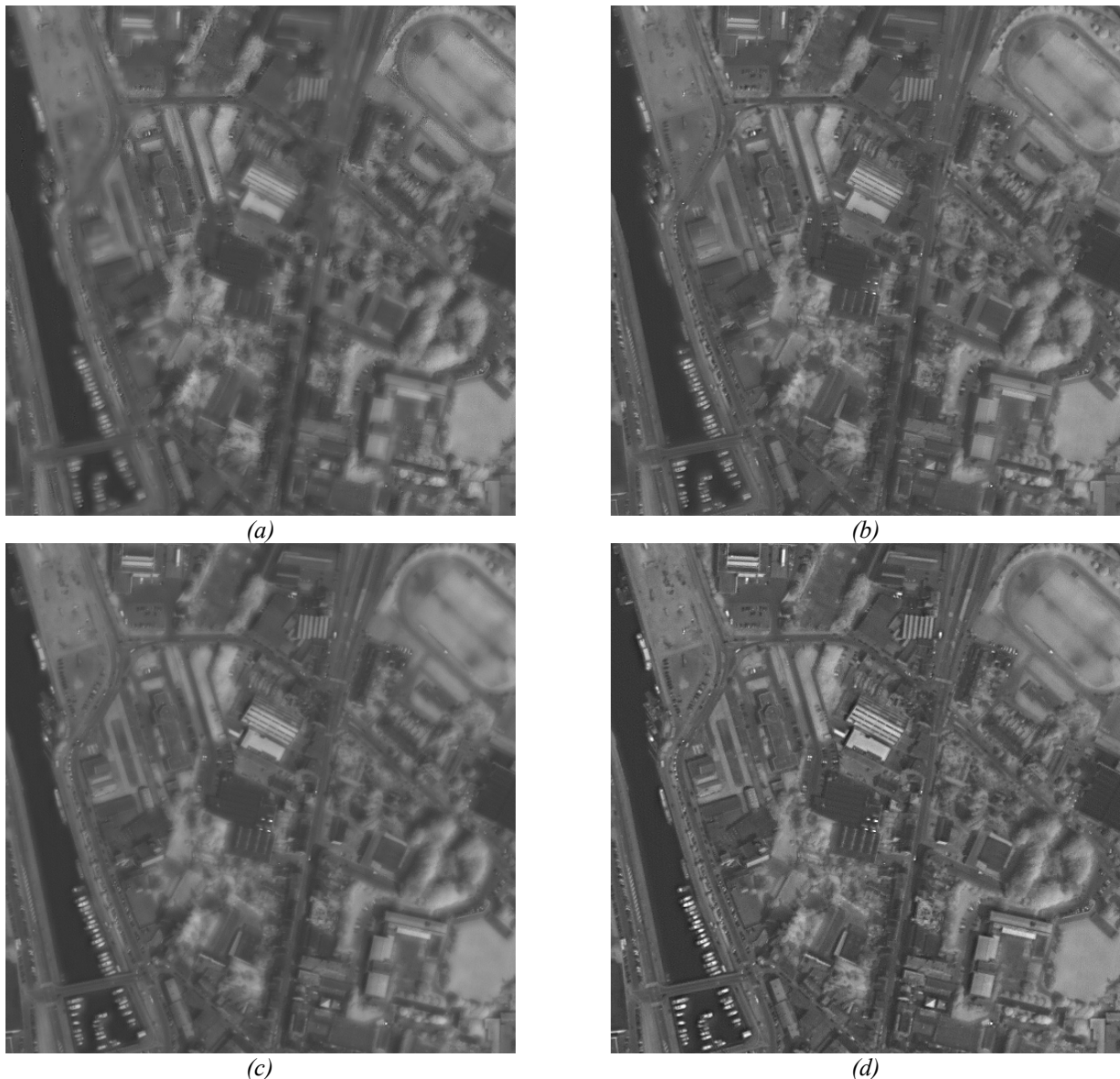


Figure 21. (a) Extrait du produit fusionné dans la bande PIR par la méthode UWT-RWM, (b) par la méthode UWT-ATS 3, (c) par la méthode UWT-M1, (d) par la méthode UWT-M2.

Le protocole d'évaluation quantitative des produits de fusion²⁶ a été appliqué. Les calculs sont effectués sur les images 11 bits, c'est-à-dire présentant leur dynamique complète. La dynamique de l'information analysée n'est pas du tout perceptible sur les représentations visuelles fournies ici, l'œil ne percevant qu'un petit nombre de teintes. Les différents résultats obtenus ne sont pas détaillés ici, mais sont en accord avec les autres tests réalisés sur d'autres images des satellites à très haute résolution spatiale.

De manière synthétique, la méthode UWT-ATS3 offre les meilleurs résultats pour chaque bande spectrale (deuxième propriété) ainsi que sur l'ensemble multispectral (troisième propriété). Les méthodes UWT-RWM et UWT-M2 fournissent des résultats similaires et proches de ceux de la méthode UWT-ATS3. La méthode UWT-M1 est celle donnant les moins bons résultats, tout en restant quand même satisfaisante.

Cette comparaison de différentes implémentations du concept ARSIS montre la difficulté de répondre pleinement aux besoins des utilisateurs. La méthode UWT-M1 répond à un besoin de facilité d'implémentation, rapidité de production et d'utilisation. Les méthodes UWT-RWM et UWT-ATS3 privilégient la qualité spectrale des produits de fusion et sont plus adaptés à des

traitements postérieurs tels que la classification^{42,43}. La méthode UWT-M2 est un bon compromis entre les qualités visuelle et spectrale.

3.2.4 Conclusions et Perspectives

Cette approche conceptuelle et modulaire permet de créer de nombreuses implémentations. Bien que chacun des modèles (MSM, IBSM, HRIBSM) soit indépendant, il existe quand même des combinaisons qui donneront des résultats plus satisfaisants que d'autres. Il est possible de les chaîner différemment afin d'obtenir un résultat en adéquation avec l'application visée. Cependant, ce chaînage doit se faire de manière cohérente en respectant les hypothèses mathématiques et physiques sous-jacentes à chacun des modèles.

Le concept ARSIS a été adopté et préféré à d'autres solutions de fusion d'images dans de nombreux domaines comme l'étude du milieu urbain^{42,43}, de la géologie⁴⁴, de la qualité de l'air⁴⁵ ou de climatologie⁴⁶ notamment pour l'étude de la turbidité optique de l'atmosphère claire.

Les perspectives de ces travaux sur la fusion d'images sont nombreuses. En effet, si le cadre conceptuel est bien posé, plusieurs questions sur la mise en oeuvre d'une telle approche restent ouvertes. Ainsi pour le choix des différents modèles :

- Comment mieux prendre en compte la physique du capteur ?
- Quels choix doit-on réaliser pour chacun des modèles afin d'obtenir une méthode optimale ?
- Que signifie méthode optimale ? Pour quel utilisateur ? En fonction de quelles modalités ? Pour quels écarts de résolution ?
- Quel lien existe-t-il entre chacun des modèles MSM, IBSM, HRIBSM ?

Enfin on peut se demander si le cadre conceptuel proposé reste valable lorsque les modalités à fusionner sont très différentes ou si l'on a plusieurs images à haute résolution spatiale ou plusieurs images avec différentes résolutions spatiales dans l'ensemble disponibles. Qu'elle est alors la bonne stratégie de traitement ?

⁴² Raptis, V.S., Vaughan, R.A., Ranchin, T. and Wald, L., 1998. Assessment of different data fusion methods for the classification of an urban environment. *In* Proceedings of the second conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 28-30, 1998, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 167-182.

⁴³ Couloigner, I., Ranchin, T., Valtonen, V.P. and Wald, L., 1998. Benefit of the future SPOT 5 and of data fusion to urban mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 8, pp. 1519-1532.

⁴⁴ Yang, W., Cauneau, F., Paris, J-P, and Ranchin, T., 2000. Fusion of SAR and SPOT images for the detection of geological features over the Three Gorges Dam site, China. *In* Proceedings of the third conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 26-28, 2000, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 137-142.

⁴⁵ Wald L. and Baleynaud J.M., 1999. Observing air quality over the city of Nantes by means of Landsat thermal infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 5, pp. 947-959.

⁴⁶ Cros S., Schroedter-Homscheidt M., Ranchin T., Wald L., Improvement of operational atmospheric parameters observation: increasing spatial resolution of aerosols optical depth maps by a data fusion process. European Meteorological Society, 4th annual meeting, 26-30 September 2004, Nice, France.

3.3 Extraction des paramètres de vent à partir d'une seule image ROS

Les modèles CMOD fournissent un coefficient de rétrodiffusion pour une vitesse et une direction du vent ainsi qu'un angle d'incidence donné. Le modèle doit être inversé afin de connaître la vitesse et la direction du vent. Comme le coefficient de rétrodiffusion et l'angle d'incidence sont connus en tout point de l'image ROS, un des paramètres (vitesse ou direction) doit être connu afin de pouvoir extraire le second⁴⁷. Furevik et Korsbakken⁴⁸ ont montré qu'il est possible d'établir une carte des vitesses de vent à une résolution de 500 m quand on connaît précisément sa direction. Wackerman *et al.*⁴⁹ ont mis au point une méthode originale d'extraction de la direction du vent. Ils obtiennent une carte des vents à une résolution de 16 km en s'appuyant sur l'effet de tilt : les diffuseurs de Bragg étant modulés par les vagues de vent, des structures de basse fréquence spatiale apparaissent sur les images RSO. Comme ces structures sont dues au vent, leur direction permet une bonne estimation de la direction du vent. La représentation hiérarchique de l'information apporte par son approche décorrélée des échelles présentes dans l'image la possibilité d'extraire à partir de l'image seule la direction du vent.

Une propriété de la transformée de Fourier rapide (TFR) lors de son application à un signal à deux dimensions (une image) est la possibilité d'obtenir l'orientation des structures spatiales de l'image. Wackerman *et al.* ont appliqué cette méthode pour l'extraction de la direction des structures dues au vent. Cependant, l'image a dû être moyennée spatialement, notamment pour limiter les effets du chatoiement (speckle). Ceci explique la faible résolution de la grille des vents obtenue. L'approche que nous avons développée au cours de la thèse de Nicolas Fichaux est apparentée à cette méthode. Cependant, des cartes de vent à haute résolution spatiale sont obtenues de la manière suivante :

- une décomposition hiérarchique de l'information permet d'isoler les structures dues aux vaguelettes levées par le vent ;
- une TFR est appliquée sur cette image contenant principalement des vagues de vent ;
- l'extraction des directions locales de vent est réalisée ;
- l'inversion du modèle CMOD-4 permet d'obtenir une vitesse pour chaque direction locale du vent.

La figure 22 schématise cette approche qui est détaillée ci-après.

L'originalité de nos travaux résulte dans cette approche hiérarchique du problème qui permet, à partir d'une seule image et sans information extérieure, d'extraire à la fois la direction et la vitesse du vent. Elle est basée sur l'application de TFR locales sur l'image des vagues de vent obtenue par transformée en ondelettes. Le spectre est lié, par l'effet de résonance de Bragg et l'effet de tilt, au spectre de l'état de surface marine.

Le second plan de coefficients d'ondelettes caractérise la différence d'information entre une résolution de 25 m et une résolution de 50 m, il contient donc les primitives dont la répétitivité spatiale se situe entre 25 et 50 m. La fréquence spatiale de ces primitives est située dans le domaine des vagues générées par le vent (ou 'mer du vent').

⁴⁷ Mastenbroek, K. 1998. High resolution wind fields from ERS SAR, *ESA special earth observation quarterly* 59, pp. 20-22

⁴⁸ Furevik, B. et Korsbakken E. , 2000. Comparison of derived wind speed from SAR and scatterometer during the ERS tandem phase, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38 (2), pp. 1113-1121

⁴⁹ Wackerman, C.C., Rufenach C.L., Schuman R.A., Johannessen J.A., Davidson K.L. , 1996. Wind vector retrieval using ERS1 Synthetic Aperture Radar Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34 (6), pp. 1343-1352

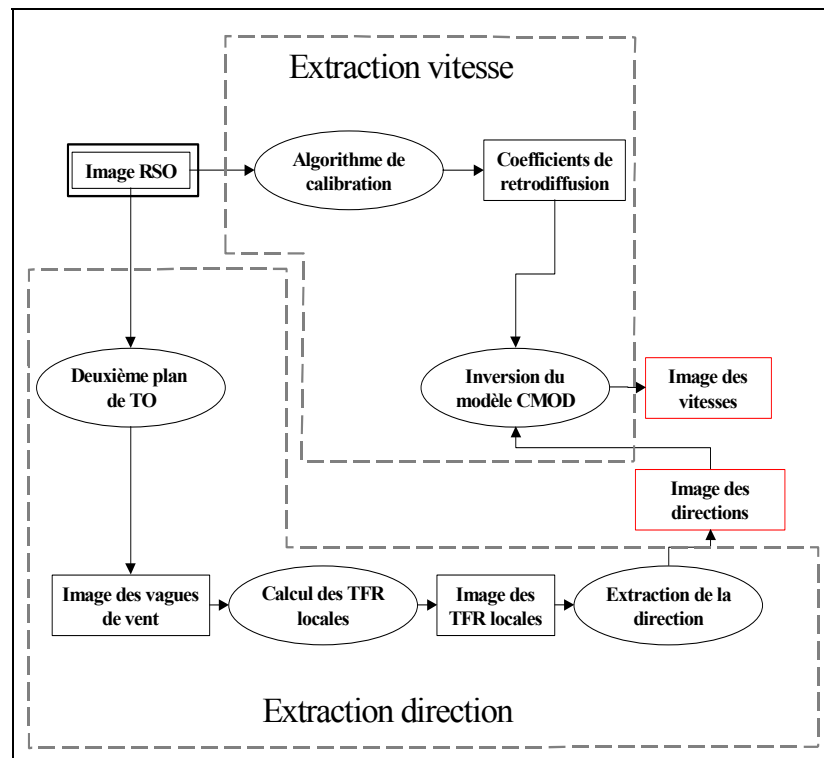


Figure 22. Algorithme d'extraction combinée vitesse et direction du vent à partir d'images RSO

Afin d'extraire la direction du vent, une TFR à fenêtre glissante est appliquée sur l'image de la mer du vent : le spectre est calculé sur des vignettes successives de l'image des coefficients d'ondelettes. Ainsi, le maximum d'intensité spectrale est lié au spectre des vagues. La direction indiquée par ces maximums spectraux est la direction locale de la mer du vent et donc du vent lui-même. La figure 23 illustre ce principe : la direction du vent est la droite qui relie les deux points sombres, maxima du spectre local.

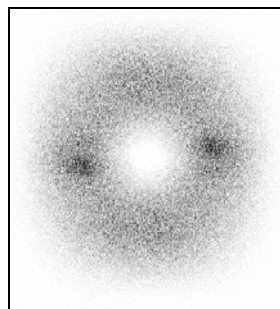


Figure 23 : Spectre local de la mer du vent obtenu par TFR

Cette méthode a été appliquée sur une image ROS PRI du satellite ERS2 issue de la base de données de l'expérience FETCH⁵⁰ acquise le 19/03/1998 à 10:29 UTC. La direction du vent a été mesurée à cet instant à proximité de la zone de prise de vue par les quatre capteurs à bord du bateau de l'expérience FETCH. La direction mesurée était de 300° nord (positif vers l'est). Un extrait de l'image ROS de 1024x1024 pixels a été réalisé. Les vecteurs vent ont été obtenus à partir de vignettes de taille 128x128 pixels. Etant donné que la résolution des données ROS PRI est de 12,5 m, la carte des directions de vent obtenue a donc une résolution de 1600 m. Il faut signaler que la méthode ici présentée est conçue pour fonctionner éventuellement à plus haute résolution.

⁵⁰ <http://dataserv.cetp.ipsl.fr/FETCH>

La figure 24 présente les résultats obtenus : les directions locales du vent (segments blancs) sont à comparer avec la direction mesurée à bord du bateau (flèche). Nous pouvons voir que le champ de directions obtenu est cohérent et, de plus, correspond aux mesures in situ effectuées avec une erreur inférieure à 15° , donc adaptée à la précision en direction des CMOD.

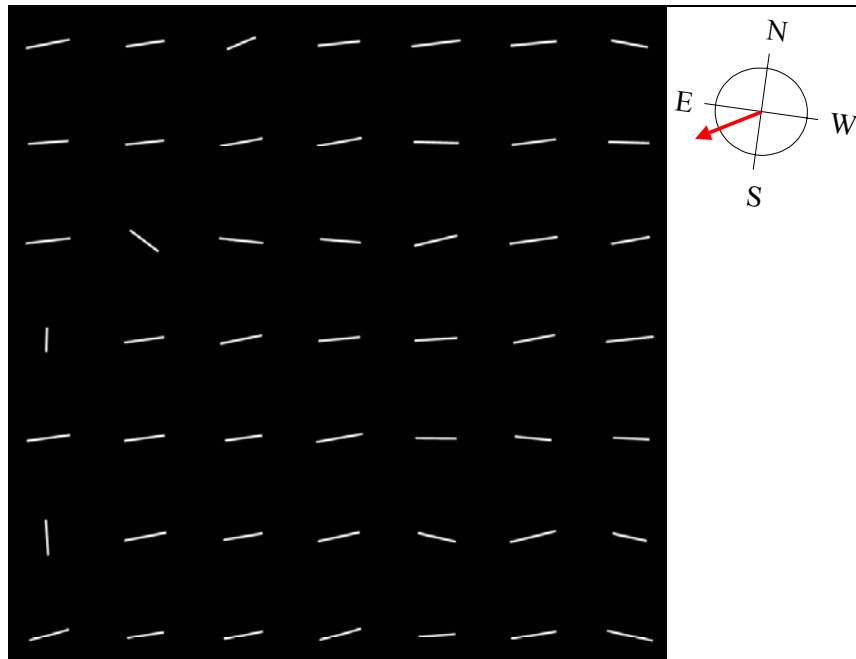


Figure 24 : Champ de directions du vent obtenu

Des artefacts sont présents, dus à la présence de phénomènes de plus grande longueur d'onde à haute cohérence spatiale. Ils n'ont pas été filtrés dans notre méthode : la transformée en ondelettes assure la décorrélation partielle des différentes échelles, mais pas leur indépendance. De plus, les images ROS sont souvent affectées par un phénomène lié à la physique du capteur : le *cutoff* azimuthal. Lorsque le vent souffle dans la direction d'acquisition du capteur, ce phénomène engendre une rotation des vecteurs vent. Il devient donc très difficile, voire impossible, de détecter à l'aide de la mer du vent la direction locale du vent. Mais ce phénomène disparaît pour les grandes échelles (située entre 800 et 1600 m) et les allées de vent sont imagées correctement par le ROS. Il est donc nécessaire de combiner l'approche proposée avec une détection des allées de vent visibles à une plus grande échelle caractéristique lorsque l'image est acquise dans des conditions où ce phénomène apparaît.

3.4 Autres domaines

Les autres innovations importantes développées dans le cadre de ma recherche concernent :

- le développement d'une méthodologie automatique pour la détection de la vigne à partir de données aériennes. L'étude de la vigne par télédétection se fait au travers de sa structure et de sa texture. A partir de la connaissance de ces dernières, il est possible d'accéder à la caractérisation des pieds de vigne, de leur état phytosanitaire, du type de conduite de la vigne, ... Cependant toute cette étude fine de la vigne ne peut avoir lieu qu'une fois sa présence détectée. Or, des méthodes purement texturales ou purement radiométriques ne donnent pas des résultats satisfaisants. L'approche développée a consisté en une combinaison des représentations radiométrique et géométrique de la vigne. Cette méthode combine une classification texturale et spectrale, et l'utilisation d'un système d'information géographique. La vigne ayant des échelles

spatiales très marquées, il a été tout naturel d'utiliser l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes pour caractériser l'information de texture relative à la vigne⁵¹.

- la qualité de l'air et la spatialisation des mesures de polluants fournies par les capteurs in situ à l'aide de données d'observation de la Terre et de bases cartographiques. Cette approche s'inscrit dans un cadre multidisciplinaire et a fait l'objet d'une intense collaboration avec le laboratoire Image & Ville de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg et l'agence de surveillance de la qualité de l'air en Alsace (ASPA). L'objectif de cette recherche est l'amélioration de la compréhension des phénomènes de pollution urbaine afin d'établir les budgets espace-temps des personnes, comme prévu dans le cadre de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE). Les résultats principaux concernent la représentativité des stations de mesures, la typologie des réseaux, la sectorisation des quartiers, la modélisation et la représentation des points de mesures de la pollution urbaine par la simulation d'une densification du réseau. Cette densification du réseau a été réalisée par la mise en place d'une carte d'identité des stations de mesure associée à la caractérisation spatiale et spectrale des lieux et par conséquent, à une meilleure cartographie de la répartition spatiale des polluants atmosphériques. Elle a permis le développement d'indicateurs morphologiques, d'une méthodologie de définition de stations virtuelles⁵².

⁵¹ Ranchin, T., Naert, B., Albuisson, M., Boyer, G. and Astrand, P., 2001. An automatic method for vine detection in airborne imagery using wavelet transform and multiresolution analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67, 1, pp. 91-98.

⁵² Ung, A., Ranchin, T., Wald, L., Weber, C., Hirsch, J., Perron, G. and Kleinpeter, J., 2002, Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. *PhotoInterprétation*, 2000 3/4, pp. 53-64.

4 Valorisation

4.1 Publications et brevets

Mes recherches dans le domaine de la fusion d'images ont donné lieu à un dépôt de brevet commun ARMINES/Aérospatiale en 1992. Mes activités de recherche ont fait l'objet de 21 articles (dont 1 à paraître), de quatre chapitres de livres et de multiples communications dans des colloques nationaux et internationaux. La liste complète de mes publications est fournie en Annexe 2.

4.2 Distinctions

La qualité de mes travaux a été reconnue par l'attribution de deux prix par la société américaine de photogrammétrie et télédétection (ASPRS) pour des articles soumis en 1997 et 2000. Le premier est le prix "Autometrics Award 1997" du journal international *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* pour l'article WALD, Lucien, RANCHIN, Thierry and MANGOLINI, Marc, 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63, 6, pp. 691-699.

Le second est le "First prize of the ERDAS Award 2000" du journal international *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* pour l'article RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 1, pp.49-61.

4.3 Irrigation du tissu économique

La recherche pratiquée au sein de l'Ecole des Mines de Paris est une recherche sous contrat. Ainsi, j'ai réalisé depuis mon entrée à l'Ecole des Mines de Paris (fin 1994) un ensemble de contrats à finalité exprimée pour des entreprises comme Alcatel Space Industries, Aérospatiale, EADS, Alstom TDI, EDF, des contrats de recherche pour des grands organismes comme le CNES, l'ADEME, la DGA, l'ESA et l'INTA, ainsi que pour le ministère de la recherche et la commission européenne. Une liste de ces contrats est fournie en Annexe 4.

5 Formation

5.1 Encadrement en 3^{ème} cycle

Depuis le début de mes activités au sein de l'Ecole des Mines, l'encadrement des étudiants fait partie de mes préoccupations. Ainsi j'ai encadré 14 étudiants en stage de DEA, DESS et d'Ingénieur et divers stages de maîtrise.

Cette activité de formation m'a aussi conduit au co-encadrement puis à l'encadrement des élèves-chercheurs au cours de leur doctorat. Ainsi, j'ai co-encadré entre 1995 et 1998 Melle Isabelle Couloigner. Cette dernière a soutenu avec succès sa thèse en 1998 et après un post-doctorat effectué au sein du centre de Géomatique de l'Université Laval à Québec, Canada, elle a accédé à un poste de professeur Assistant au Département Génie Géomatique de la faculté d'Engineering de l'Université de Calgary, Alberta, Canada. J'ai poursuivi cette activité de co-encadrement entre 2000 et 2002 au travers de la thèse de Thierry Poglio, actuellement ingénieur dans une SSII.

Entre 2000 et 2003, j'ai assumé seul l'encadrement de deux doctorants, Renaud Péteri et Nicolas Fichaux inscrits au sein des formations doctorales de l'Ecole des Mines de Paris. Renaud Péteri après un post-doctorat au sein du consortium ERCIM a intégré l'ONERA où il poursuit des activités de recherche dans le domaine de l'observation de la Terre. Nicolas Fichaux a intégré la Division Energies Renouvelables de l'ADEME, où il s'occupe du suivi des domaines de l'éolien et du petit hydraulique en France et en Europe.

Enfin depuis octobre 2004, j'assume l'encadrement d'un doctorant Mohammed Bassam Ben Ticha qui poursuit les travaux de recherche de Nicolas Fichaux sur l'évaluation de la ressource éolienne en mer à l'aide de méthodes de fusion de données, je participe à l'encadrement des thèses de Claire Thomas sur la fusion d'images et d'Anne-Lise Beaulant sur l'évaluation du bilan espace-temps de qualité de l'air.

5.2 Enseignements

L'enseignement fait partie de mes activités. L'enseignement que je dispense et auquel je participe concerne aussi bien l'Ecole des Mines de Paris, que l'université et les autres écoles d'ingénieurs.

A l'Ecole des Mines de Paris, j'ai relancé en 1996 le cours de traitements d'images au sein de l'Institut Supérieur en Informatique et Automatique (I.S.I.A.) et je continue à y intervenir. Je participe à l'enseignement dans le cycle des ingénieurs civils notamment au travers de l'Acte d'Entreprendre et du Module d'Intégration Généraliste "Electricité du Futur" en première année.

A l'université, j'ai participé à l'enseignement de l'option Télédétection du DEA "Propagation, Télécommunications et Télédétection" de l'Université de Nice - Sophia Antipolis entre 1991 et 2001 et du DESS commun entre le CETEL et l'université de Paris VI depuis 1994.

Je participe aussi depuis 2000 à l'enseignement Systèmes d'Information Géographique de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (E.N.T.P.E.) et j'ai participé entre 2002 et 2004 à l'enseignement Systèmes d'Information Localisée de l'option "Transports Intelligents" de l'Institut des Applications Avancées de l'Internet (I.A.A.I.).

5.3 Formation continue

La formation que je dispense est aussi dirigée vers les entreprises et les instituts au travers de la formation continue. Depuis 1996, je suis responsable de la formation continue à l'Ecole des Mines

de Paris dans le domaine des Systèmes d'Information Géographique. Ces formations de durée variable (entre 1 et 4 semaines) ont été dispensées principalement à destination de l'étranger. Depuis cette date, j'ai aussi dispensé quelques formations continues en traitements d'images. Depuis 1994, je participe aussi à la formation continue dispensée par le Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (GDTA).

6 Animation

6.1 Interne au laboratoire

La mise en oeuvre de la recherche passe aussi par des activités d'animation. Au sein du Groupe Télédétection & Modélisation du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, j'anime deux champs de recherche principaux : la ville et l'éolien. Pour ces deux champs d'investigation, je coordonne les activités internes du laboratoire. Ainsi depuis 2000, j'encadre des doctorants et accueille des visiteurs scientifiques extérieurs dans le cadre de leur recherche.

Dans le domaine de l'éolien, je définis l'orientation de la recherche et j'encadre un doctorant sur l'évaluation de la ressource éolienne en milieu off-shore à l'aide de données satellites. L'animation de ce champ de recherche nécessite la définition des objectifs et de la stratégie.

Dans le domaine de la ville, deux aspects sont traités. Le premier concerne la cartographie de la voirie en milieu urbain. J'ai encadré un doctorant et nous avons accueilli un visiteur scientifique au mois de mars et avril 2003. Le second aspect traité est la pollution de l'air qui concerne un doctorant et 10 % du temps de recherche du professeur Lucien Wald, responsable du Groupe. Pour ce domaine, je suis en charge de la définition des objectifs de recherche et de la stratégie mise en oeuvre pour la pérennité de ces travaux.

Enfin, mentionnons que la recherche en fusion de données résulte d'une collaboration étroite entre Lucien Wald et moi. Nous définissons ensemble nos champs d'investigation et les moyens de parvenir aux objectifs.

6.2 Externe au laboratoire

L'animation externe au laboratoire correspond à des activités très diverses.

Ainsi j'ai co-organisé trois colloques internationaux sur la Fusion de données dans le domaine d'observation de la Terre en 1996, 1998 et 2000. J'ai participé à des comités scientifiques pour des colloques internationaux (Fusion of Earth Data 1996, 1998, 2000, Telegeo 2000, SCI2001, FUSION 2001, Telegeo 2002, URBAN 2003, FUSION 2004, ACIVS 04, URBAN 2005, ACIVS 2005), ai été "chairman" de sessions dans différents colloques (Fusion of Earth Data 1996, 1998, 2000, Fusion 2001, EARSeL 2002) et est aussi participé à la relecture d'articles pour le colloque du GRETSI 2003 et du prochain colloque du GRETSI 2005.

En collaboration avec Lucien Wald, nous avons fondé et animé le Special Interest Group d'EARSeL "Data fusion" ainsi que son site Web (www.data-fusion.org).

J'ai présenté un ensemble de communications invitées au cours de colloques internationaux (IMACS 1997, SPIE 1999, Fusion 2001) et de conférences invitées, notamment lors de l'Advanced Studies Institute de l'OTAN sur la fusion de données⁵³, et au centre satellitaire de l'Union Européenne(EUSC) à Torrejon, Espagne.

⁵³ Ranchin, T., 2002. Data Fusion in remote sensing and improvement of the spatial resolution of satellite images. In: *Multisensor Fusion*, NATO Advanced Studies Institute on Multisensor Data Fusion, Pitlochry, Perthshire, Scotland, June 25-July 7, 2000. Book Series: NATO SCIENCE SERIES: II: Mathematics, Physics and Chemistry, volume 70. Edited by A. K. Hyder, E. Shahbazian and E. Waltz. Published by Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Hardbound, ISBN 1-4020-0722-1, Paperback, ISBN 1-4020-0723-X, 960 p., pp. 633-656.

Ranchin, T., 2002. Wavelets for modeling and data fusion in remote sensing. In: *Multisensor Fusion*, NATO Advanced Studies Institute on Multisensor Data Fusion, Pitlochry, Perthshire, Scotland, June 25-July 7, 2000. Book Series: NATO SCIENCE SERIES: II: Mathematics, Physics and Chemistry, volume 70. Edited by A. K. Hyder, E. Shahbazian and E. Waltz. Published by Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Hardbound, ISBN 1-4020-0722-1, Paperback, ISBN 1-4020-0723-X, 960 p., pp. 351-363.

Je participe à de nombreuses sociétés savantes (SFPT, EARSeL, IEEE GRS et SP, ASPRS, ISIF, ...) et de nombreux groupes de travail tant nationaux (GDR ISIS, GDR SIGMA) qu'internationaux (IEEE GRSS Data Fusion committee, EuroSDR, EARSeL).

Cette animation externe au laboratoire comprend aussi la relecture d'articles pour des revues nationales (Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, Revue Internationale de Géomatique) et internationales (IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Image Processing Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing International Journal of Remote Sensing, Canadian Journal of Remote Sensing, Télédétection) et l'expertise notamment pour la commission européenne, le programme de recherche en télédétection de Belgique, le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada et le research grant council of Hong Kong.

7 Conclusions et Perspectives

Mes activités telles qu'elles sont décrites dans ce document de synthèse devraient se poursuivre dans les prochaines années au sein de l'Ecole des Mines de Paris. Le cadre qui m'y est offert me permet de développer harmonieusement et de manière efficace la recherche qui m'intéresse.

Deux nouveaux points devraient être l'objet de développements dans mes activités de recherche. Le premier concerne la prise en compte de la dynamique des phénomènes observés. Le deuxième concerne la prise en compte et l'interaction des modèles dans les systèmes d'information géographique et avec la géographie numérique.

Les thèmes abordés dans ce document devraient être explorés encore pendant quelques années.

Pour le domaine de l'extraction de la voirie, l'approche proposée sera appliquée à d'autres types de réseaux. Une généralisation de l'approche et un renforcement de la problématique sont nécessaires avec l'arrivée des images à très haute résolution spatiale (sub-métrique) et de la très haute résolution spectrale (hyperspectrale). L'augmentation de la résolution spatiale des images entraîne une forte augmentation des artefacts (objets sur la route, ombres portées, prise en compte des trottoirs et/ou des bas-côtés,...). L'utilisation de données multispectrales ou hyperspectrales permettra de lever des ambiguïtés. Des liens avec la fusion d'images sont possibles au travers de l'exploration de ces nouvelles problématiques. La possibilité de l'utilisation d'autres modalités (radars, lidars,...) sera aussi explorée.

Pour le domaine de la fusion d'images, le concept ARSIS fera l'objet d'améliorations afin de prendre en compte toutes sortes de modalités. La prise en compte de l'influence de la chaîne d'acquisition dans le processus de fusion fera l'objet de recherches dans un futur proche afin d'améliorer la qualité des produits de fusion et d'adapter les outils de traitement. Une exploration des outils de représentation hiérarchique de l'information sera poursuivie et la modélisation intra et inter-échelles fera l'objet d'une attention particulière. L'étude de l'interaction entre les différents modèles constituant la chaîne de traitement sera étudiée afin de quantifier leur inter-dépendance.

Dans le domaine de l'évaluation des ressources éoliennes en offshore, nous nous pencherons sur la fusion d'informations à différentes échelles spatiales et temporelles, de différentes modalités et ayant différentes représentativités afin de produire des statistiques temporelles spatialisées. Ces statistiques favoriseront le développement de la production d'énergie éolienne offshore.

Le domaine de la qualité de l'air continuera à être exploré, notamment au travers de l'exposition individuelle des personnes. L'établissement de budget espace-temps sera visé et nécessitera donc la poursuite des travaux de spatialisation de l'information relative à la répartition des polluants, la prise en compte des problématiques de mobilité des personnes et l'intégration de cet ensemble de données dans des systèmes d'information géographique. L'exploitation de ces informations s'effectuera en collaboration avec des médecins épidémiologistes et des autorités publiques. On contribuera ainsi à une mission de santé publique.

Je chercherai aussi à poursuivre la diffusion de mes résultats en maintenant, et si possible en augmentant le niveau de mes publications, et en continuant à dispenser un enseignement de haut niveau.

La série de colloque Fusion of Earth Data a été interrompue en 2002, mais cette animation de la recherche dans le domaine de la fusion de données en environnement se poursuit et a été reportée

dans différents colloques (EARSeL 2002, 2003, 2004 et 2005, URBAN 2003 et 2005, Fusion 2003).

Annexe 1 : Curriculum vitae

CURRICULUM VITAE

I - ETAT CIVIL

Nom/Prénom : RANCHIN Thierry
Date de naissance : 11/03/1966
Nationalité : Française
Situation militaire : Libéré
Situation familiale : Concubinage
Adresse : 13 rue du Docteur Pierre Richelmi, Le Balzac, bât. B
 06300 NICE Tel : 04 93 89 75 23

II - FORMATION - DIPLÔMES - DISTINCTIONS

Etudes supérieures :

- Doctorat en Sciences de l'Ingénieur de l'Université de Nice-Sophia Antipolis (1993).
Titre : *Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection.*
- D.E.A. Informatique Signaux Systèmes option traitement du signal (Université de Nice-Sophia Antipolis) (1991)
- Maîtrise Electronique Electrotechnique Automatique (Université de Nice-Sophia Antipolis) (1990)

Distinctions

1997 Autometrics Award du journal international Photogrammetric Engineering & Remote Sensing pour l'article : WALD, Lucien, RANCHIN, Thierry and MANGOLINI, Marc, 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63, 6, pp. 691-699.

2000 First prize of the ERDAS Award du journal international Photogrammetric Engineering & Remote Sensing pour l'article : RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 1, pp.49-61.

Langues étrangères :

- Anglais : lu, parlé, écrit.

III - SITUATION ACTUELLE

Depuis le 15 décembre 1994 :

ARMINES / ECOLE DES MINES DE PARIS (Sophia Antipolis)

Ingénieur de recherche, Centre Energétique et Procédés

Activités de recherche en cartographie du milieu urbain à l'aide d'images satellitaires et de méthodes de fusion de données, en utilisation des systèmes d'information géographique, en détection d'objets dans les images satellitaires - Négociation et conduite de conventions de recherche - Enseignement - Encadrement de stagiaires et doctorants - Co-organisateur et membre du comité scientifique de la série de colloques internationaux « Fusion of Earth Data ».

IV - EMPLOIS ANTERIEURS et SEJOURS LONGS A L'ETRANGER

Mai - décembre 1998

Université de Jena, Institut de Géographie Département de Géo-informatiques, Hydrologie et Modélisation (Allemagne)

Scientifique invité

Collaboration dans le cadre du projet Européen INCO-DC "Integrated Water Resources Management System".

Détection automatique de bâtiments ruraux à partir d'images satellites visible, radar et aériennes.

Janvier - mars 1994 :

Société AKVAPLAN-NIVA (Tromsø, Norvège)

Ingénieur de recherche

Installation de la bibliothèque logicielle de traitement d'images Minimage de l'Ecole des Mines de Paris.
Développement d'algorithmes et logiciels d'analyse d'images satellitaires de l'océan (température et production primaire). Evaluation de leur qualité. Applications aux mers arctiques.

Septembre 1991 - septembre 1993 :

ECOLE des MINES de PARIS

Elève-chercheur au groupe Télédétection & Modélisation du centre d'Energétique.

V - ENSEIGNEMENT

Principaux enseignements :

- Responsable de l'enseignement "Traitements d'images" de l'Institut Supérieur en Informatique et Automatique (I.S.I.A.) de l'Ecole des Mines de Paris. Création de trois modules de ce cours et du support écrit : depuis 1996.
- Participation à l'enseignement de 1^{ère} année du cycle civil des ingénieurs de l'Ecole des Mines de Paris: depuis 2002.
- Encadrements de stagiaires de DEA et de DESS : depuis 1995 (cf. liste détaillée en Annexe 3).
- Co-encadrements et encadrements de doctorants : depuis 1995 (cf. liste détaillée en Annexe 3).
- Participation aux enseignements, travaux pratiques, travaux dans les DEA "Propagation, Télécommunications et Télédétection" de l'Université de Nice - Sophia Antipolis, et "Océanographie et Environnement" de l'Université de Paris VI, et dans le DESS "Télédétection, Méthodes et Applications" de l'Université de Paris VI : 1991 à 1993.

Autres enseignements :

- Formation continue sur les Systèmes d'Information Géographique à l'Ecole des Mines de Paris : depuis 1996.
- Participation à l'enseignement du DESS du CETEL et à la formation continue au Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (GDTA) à Toulouse : depuis 1994.
- Participation à l'enseignement Systèmes d'Information Localisés de l'option "Transports Intelligents" de l'Institut des Applications Avancées de l'Internet (I.A.A.I.) : 2002 à 2004.
- Participation à l'enseignement Systèmes d'Information Géographique de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (E.N.T.P.E.) : depuis 2000.

V - BREVETS ET PUBLICATIONS

- Brevet : 1,
- Mémoires (travaux issus de la formation de 3^{ème} cycle) : 2
- Ouvrages : 3
- Contribution à des ouvrages collectifs : 4
- Articles dans des revues avec comité de lecture: 21 (dont 1 à paraître)
- Communications : environ 80
- Divers rapports contractuels

VI - PARTICIPATION A DES SOCIETES SAVANTES

- Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc (IEEE).
- International association for urban climate (IAUC).
- International Society of Information Fusion (ISIF).
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS).
- European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL).
- Société Française de Photogrammétrie et Télédétection (SFPT).
- Association des Universités Partiellement ou Entièrement de Langue Française (AUPELF).
- Programme de Recherche Concerté du CNRS, ISIS (Informatique, Signaux, Images et Systèmes).
- Programme de Recherche Concerté du CNRS, SIGMA (Systèmes d'Information Géographique - Méthodologies et Applications).

Annexe 2 : Liste détaillée des publications

Liste des publications Mai 2005

1. BREVET

AEROSPATIALE/ARMINES. Procédé et dispositif pour augmenter la résolution spatiale d'images à partir d'autres images de meilleure résolution spatiale. Inventeurs : MANGOLINI, Marc, RANCHIN, Thierry, et WALD, Lucien. Brevet français n° 92-13961, 20/11/92.

2. OUVRAGES

THESE

RANCHIN, Thierry, juillet 1993. *Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection*. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Ingénieur, Université de Nice-Sophia Antipolis, 146 p.

ACTES DE CONFÉRENCES

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien editors, 1996. Proceedings of the conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Cannes, France, February 6-8, 1996, published by SEE/URISCA, Nice, France, 154 p.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien editors, 1998. Proceedings of the second conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 28-30, 1998, published by SEE/URISCA, Nice, France, 222 p.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien editors, 2000. Proceedings of the third conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 26-28, 2000, published by SEE/URISCA, Nice, France, 166 p.

CONTRIBUTIONS A DES OUVRAGES COLLECTIFS

RANCHIN, Thierry, 2002. Data Fusion in remote sensing and improvement of the spatial resolution of satellite images. In: *Multisensor Fusion*, NATO Advanced Studies Institute on Multisensor Data Fusion, Pitlochry, Perthshire, Scotland, June 25-July 7, 2000. Book Series: NATO SCIENCE SERIES: II: Mathematics, Physics and Chemistry, volume 70. Edited by A. K. Hyder, E. Shahbazian and E. Waltz. Published by Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Hardbound, ISBN 1-4020-0722-1, Paperback, ISBN 1-4020-0723-X, 960 p., pp. 633-656.

RANCHIN, Thierry, 2002. Wavelets for modeling and data fusion in remote sensing. In: *Multisensor Fusion*, NATO Advanced Studies Institute on Multisensor Data Fusion, Pitlochry, Perthshire, Scotland, June 25-July 7, 2000. Book Series: NATO SCIENCE SERIES: II: Mathematics, Physics and Chemistry, volume 70. Edited by A. K. Hyder E. Shahbazian and E. Waltz. Published by Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Hardbound, ISBN 1-4020-0722-1, Paperback, ISBN 1-4020-0723-X, 960 p., pp. 351-363.

RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien and MANGOLINI, Marc, 2001. Improving spatial resolution of images by means of sensor fusion. A general solution: the ARSIS method. In: *Remote Sensing and Urban Change, GISDATA 9*. Edited by J.-P. Donnay, M.J. Barnsley and P.A. Longley. Published by Taylor & Francis, London, ISBN 0-7484-0860-6, 224 p. Chapter 2, pp. 21-37.

RANCHIN Thierry and WALD Lucien, Chapter 11: Data fusion in remote sensing of urban and suburban Areas. In *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Edited by C. Jurgens and T. Rashed, Kluwer Academic Publishers, 360 p., 2005.

3. ARTICLES AVEC COMITE DE LECTURE

BLANC, Philippe, BLU, Thierry, RANCHIN, Thierry, WALD Lucien and ALOISI, Roberto, 1998. Using iterated filter banks within the ARSIS concept for producing 10 m Landsat multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 12, pp. 2331-2344.

COULOIGNER, Isabelle, RANCHIN, Thierry, VALTONEN, Véli Pekka et WALD, Lucien, 1997. Apport de SPOT 5 à la cartographie urbaine. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 145, pp. 33-38.

COULOIGNER, Isabelle, RANCHIN, Thierry, VALTONEN, Véli Pekka and WALD, Lucien, 1998. Benefit of the future SPOT 5 and of data fusion to urban mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 8, pp. 1519-1532.

COULOIGNER, Isabelle and RANCHIN, Thierry, 2000. Mapping of urban areas: a multiresolution modeling approach for semi-automatic extraction of streets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 7, pp. 867-874.

FICHAUX, Nicolas, POGGIO, Thierry and RANCHIN Thierry, August 2004. Mapping the offshore wind resources: synergetic potential of SAR & Scatterometer data. Submitted to *IEEE Journal of Oceanic Engineering*

FICHAUX, Nicolas and RANCHIN, Thierry, 2002. Evaluation du potentiel éolien offshore par radars spatio-portés : vers une approche multisource. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 163, pp. 3-8.

FICHAUX, Nicolas and RANCHIN, Thierry, 2002. Combined extraction of high spatial resolution wind speed and direction from SAR images: a new approach using wavelet transform. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 3, pp. 510-516.

MANGOLINI, Marc, RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1995. Evaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de SPOT. *Bulletin Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 137, pp. 24-29.

PETERI, Renaud et RANCHIN Thierry, 2003. Evaluation quantitative de méthodes d'extraction de rues : choix d'une référence. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 170, pp. 23-29.

PETERI, Renaud et RANCHIN Thierry, 2004. Potentialités des nouveaux capteurs à très haute résolution spatiale pour l'extraction des réseaux de rues urbains. *Revue internationale de géomatique*. Volume 14/2004, pp. 485-504.

PETERI Renaud, COULOIGNER, Isabelle and RANCHIN Thierry, 2004. How to assess quantitatively road extracted from high resolution imagery? *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 12, pp. 1449-1456.

RANCHIN Thierry, AIAZZI Bruno, ALPARONE Luciano, BARONTI Stefano, WALD Lucien, 2003. Image fusion. The ARSIS concept and some successful implementation schemes. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Volume 58, 1-2, pp 4-18.

RANCHIN, Thierry, NAERT, Bernard, ALBUISSON, Michel, BOYER, Gilbert and ASTRAND, Pär, 2001. An automatic method for vine detection in airborne imagery using wavelet transform and multiresolution analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67, 1, pp. 91-98.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1993. The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 3, pp.615-619.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 1, pp.49-61.

STAUDENRAUSCH, Helmut, FLUGEL, Wolfgang-Albert, RANCHIN, Thierry, HERLIN, Isabelle, RODOLFI, Giuliano, CLARK, Michael, SCHULZE, Roland, KING, Nicolas, TEVERA, Daniel and MATONDO, Jonathan, 1999. The development of an innovative computer based "Integrated Water Resources Management System" for semi-arid catchments: concepts and first results. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*. Teil I: Allgemeine, angewandte, regionale und historische Geologie, Heft 3-4, pp. 189-212.

UNG, Anthony, RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien, WEBER, Christiane, HIRSCH, Jacky, PERRON, Gilles and KLEINPETER, Joseph, 2002, Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. *PhotoInterprétation*, 2000 3/4, pp. 53-64.

WALD, Lucien and RANCHIN, Thierry, 1995. Fusion of images and raster-maps of different spatial resolutions by encrustation: smoothing the edges. *Computers, Environment and Urban Systems*, 19, 2, pp. 77-87.

WALD, Lucien, RANCHIN, Thierry and MANGOLINI, Marc, 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63, 6, pp. 691-699.

WALD, Lucien and RANCHIN, Thierry, 2002. Comments on the paper by Liu "smoothing filter based intensity modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details". *International Journal of Remote Sensing*, 23,3, pp. 593-597.

YANG, Wunian, PU, Guo-liang, ZHENG Ping-yuan, CAUNEAU, François, RANCHIN, Thierry, PARIS, Jean-Pierre, 2003. Digital processing and information extraction of multi-type and multi-temporal remote sensing images for geological hazard in the Yangtze Three Gorges Project Region, China. *Journal of the Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 30, 4, pp.378-385, (In Chinese).

4. COMMUNICATIONS

ALONSO REYES Raül, GUTIERREZ M.J., FERNANDEZ Severino, THOMAS Claire, RANCHIN Thierry and WALD Lucien, 2004. Evaluation of the quality of Quickbird fused products. In Proceedings of the 24th EARSeL Symposium "New Strategies for European Remote Sensing", 25-27 May 2004, Dubrovnik, Croatia, Oluic (ed.), Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 003 X, pp. 343-351.

ALONSO REYES Raül, MELGAR M., FERNANDEZ Severino, THOMAS Claire, RANCHIN Thierry and WALD Lucien, 2004. Fusion of SPOT5 multispectral and Ikonos panchromatic images. In Proceedings of the 24th EARSeL Symposium "New Strategies for European Remote Sensing", 25-27 May 2004, Dubrovnik, Croatia, Oluic (ed.), Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 003 X, pp. 369-375.

BASLY, Ludovic, CAUNEAU, François, COUVERCELLE, Christophe, RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1999. SAR imagery for urban air quality. In Proceedings of 18th Symposium of EARSeL, Operational remote sensing for sustainable development, Enschede, The Netherlands, 11-14 May 1998, Nieuwenhuis, G.J.A., R.A. Vaughan & M. Molenaar editors, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 165-170.

BASLY, Ludovic, CAUNEAU, François, RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1997. ERS SAR imagery for urban climate studies. In Proceedings of the third ERS symposium, Firenze, Italy, 18-21 March 1997, ESA SP 414, 3 vols, pp. 233-236.

BASLY, Ludovic, CAUNEAU, François, RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 2000. SAR imagery in urban area. In Proceedings of 19th Symposium of EARSeL, Remote Sensing on the 21st Century: Economic and Environmental Applications, Valladolid, Spain, 31 May – 2 June 1999 José Luis Casanova editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 563-568.

BEAULANT Anne-Lise, T. RANCHIN, C. WEBER, G. PERRON, J. KLEINPETER, 2005. A geographical tool for personal exposure assessment. In Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, 29-31 March 2005, Valencia, Spain, p. 225, ISBN 1-898543-92-5, (CD-ROM).

BLANC, Philippe, RANCHIN, Thierry, BLU, Thierry, WALD, Lucien and ALOISI, Roberto, 1996. Using iterated rational filter banks within the ARSIS method for producing 10 m Landsat multispectral images. In Proceedings of the conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Cannes, France, February 6-8, 1996, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 69-74.

BLANC, Philippe, WALD, Lucien and RANCHIN, Thierry, 1998. Importance and effect of co-registration quality in an example of "pixel to pixel" fusion process. In Proceedings of the second conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 28-30, 1998, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 67-74.

- BERROIR, Jean-Paul, FLÜGEL, Wolfgang Albert, HERLIN, Isabelle, HOCHSCHILD, Volker, RANCHIN, Thierry and STAUDENRAUSCH, Helmut, 1998. Integrated Water Resources Management System - A decision support system. *In Proceedings of the 27th International Symposium on Remote sensing of Environment*, Tromsø, Norway, June, 8-12, pp. 300-303.
- CAUNEAU, François and RANCHIN, Thierry, 1992. Speckle removal in SAR images using wavelet transform. *In Proceedings of 12th Symposium of EARSeL, Remote Sensing for Monitoring the Changing Environment of Europe*, Eger, Hungary, September 8-11 1992, Peter Winkler editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 97-104.
- CHERIFI, Dalila, RANCHIN Thierry, SMARA, Youssef, 2000. Reduction of Speckle in SAR images using wavelet transform: The Gamma Generalised Gaussian filter. *In Proceedings of 20th Symposium of EARSeL, A decade of trans-european remote sensing cooperation*, Dresden, Germany, June 14-16 2000, Manfred Buchroithner editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 151-157.
- COULOIGNER Isabelle, RANCHIN Thierry and WALD, Lucien, 1998. Benefit of data fusion to urban roads mapping. *In Proceedings of the second conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images"*, Sophia Antipolis, France, January 28-30, 1998, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 183-190.
- COULOIGNER, Isabelle and RANCHIN, Thierry, 1998. Extraction of urban network from high spqtqi resolution imagery using the multiresolution analysis and the wavelet transform. *In Proceedings of SPIE's 1998 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation. Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing VI*, San Diego, Californie, USA, A.F. Laine, M.A. Unser and A. Aldroubi editors, July, 19-24 1998, vol. 3458, pp. 103-112.
- COULOIGNER, Isabelle and RANCHIN, Thierry, 1999. Semi-automatic extraction of urban road network: assessment of the quality. *In Proceedings of 18th Symposium of EARSeL, Operational remote sensing for sustainable development*, Enschede, The Netherlands, 11-14 May 1998, Nieuwenhuis, G.J.A., R.A. Vaughan & M. Molenaar editors, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 309-314.
- COULOIGNER, Isabelle, RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1997. Extraction of urban network from high spatial resolution imagery. *In Proceedings of 17th Symposium of EARSeL, Future trends in remote sensing*, Lyngby, Denmark, 17-20 June 1997, Preben Gudmansen editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 213-220.
- CROS Sylvain, SCHROEDTER-HOMSCHEIDT Marion, RANCHIN Thierry, WALD Lucien, Improvement of operational atmospheric parameters observation: increasing spatial resolution of aerosols optical depth maps by a data fusion process. To be presented to European Meteorological Society, 4th annual meeting, 26-30 September 2004, Nice, France.
- FICHAUX Nicolas and RANCHIN Thierry, 2003. Evaluating the offshore wind potential: a combined approach using remote sensing and statistical methods. *In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2003*, Toulouse, France, 21-25 July 2003, Volume IV, pp. 2703 - 2705.
- FICHAUX Nicolas and RANCHIN Thierry, 2002. Mapping the offshore wind potential: a satellite based approach. *In Proceedings of the World Wind Energy Conference*, 2-6 July 2002, Berlin, Germany, H.Scheer, W.Palz, J.Schmid, P.Helm, P.Ahmels (Eds), CD-ROM PC 6.4.
- FICHAUX, Nicolas, RANCHIN, Thierry, 2002. Evaluating offshore wind energy resource by spaceborne radar sensors: toward a multi-source approach. *In Proceedings of the 21th EARSeL Symposium, Observing our environment from space: new solutions for a new millenium*, Paris, France, 14-16 may 2001, Gérard Begni editor, , A. A. Balkema,, Lisse, Abingdon, Exton (PA), Tokyo, pp. 141-146.
- FICHAUX, Nicolas, and RANCHIN, Thierry, 2002. Combined extraction of high resolution wind speed and direction maps for offshore wind energy: a satellite-based approach. *In Proceedings, « Offshore Wind Energy » Conference*, Brussels, Belgium, 10-12 December 2001, (CDROM) \07Resources\Poster\OS0083 N.pdf
- FICHAUX Nicolas, RANCHIN Thierry, 2001. Evaluating offshore wind energy resource by spaceborne radar sensors: A multi-source approach. *In Proceedings of the European Wind Energy Conference: Wind Energy for the new millenium*, Copenhagen, Danemark 2-6 July 2001, pp. 864-867.

FICHAUX Nicolas, RANCHIN Thierry, 2002. Evaluating offshore wind energy resource by spaceborne radar sensors: the use of advanced signal processing techniques. Proceedings SPIE (EUROPTO) "Remote Sensing of the ocean and sea ice 2001", Charles R. Bostater; Rosalia Santoleri; Editors, Toulouse, France, 17-21 September 2001, Vol. 4544, p. 135-144.

FUREVIK Birgitte R., STETTE Morten, RANCHIN Thierry, HASAGER Charlotte, CHRISTENSEN Lars Christian, PEIRANO, Eric, WENSINK Han, VAN HULLE Frans, SOERENSEN Paul B., JOHNSEN Harald, HURLEY Brian, JOHANNESSEN, Olav 2004. Earth Observation based services for the wind industry (EO-WINDFARM) a project within the EOMD activity. *In* Proceedings of the 2004 ENVISAT & ERS Symposium, 6-9 September 2004, Salzburg, Austria.

HOCHSCHILD, Volker, HERLIN, Isabelle, MORETTI, Sandro, RANCHIN, Thierry and STAUDENRAUSCH, Helmut, 2000. Application of remote sensing to the development of an Integrated Water Resources Management System (IWRMS). *In* Proceedings of 28th International Symposium on Remote sensing of Environment and the 3rd African Association of Remote Sensing for the Environment Symposium, 27-31 March 2000, Cape Town, South Africa, pp. 27-31.

KHEDAM Radja, BELHADJ-AISSA Aichouche, RANCHIN Thierry, 2003. Study of ICM parameters influence on images satellite contextual classification. *In* Proceedings of 22nd EARSeL Annual Symposium "Geoinformation for European-wide integration", 4-6 June 2002, Prague, Czech Republic. Tomas Benes editor, Millpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 79-85.

LEFEVRE Mireille, ALBUISSON Michel., RANCHIN Thierry, WALD Lucien, REMUND Jan, 2004. Fusing ground measurements and satellite-derived products for the construction of climatological maps in atmosphere optics. *In* Proceedings of the 23rd EARSeL Annual Symposium "Remote Sensing in Transition", 2-4 June 2003, Ghent, Belgium, Rudi Goossens editor, Millpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 85-91.

MANGOLINI, Marc, RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1993. Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. *In* De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS. Cépaduès-Éditions, 111 rue Vauquelin, Toulouse, France, 574 p., pp. 199-209.

PETERI Renaud and RANCHIN Thierry, 2004. Multiresolution snakes for urban road extraction from Ikonos and Quickbird images. *In* Proceedings of the 23rd EARSeL Annual Symposium "Remote Sensing in Transition", 2-4 June 2003, Ghent, Belgium, Rudi Goossens editor, Millpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 69-76.

PETERI Renaud and RANCHIN Thierry, 2003. Urban street mapping using Quickbird and Ikonos images. *In* Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2003, Toulouse, France, 21-25 July 2003, Volume III, pp. 1721 - 1723.

PETERI Renaud et RANCHIN Thierry, 2003. Extraction de réseaux de rues à partir d'images satellites à haute résolution spatiale. Actes du 19^{ème} colloque GRETSI, Paris, France, 8-11 septembre 2003, Volume III, pp.264-267.

PETERI Renaud, CELLE Julien and RANCHIN Thierry, 2003. Detection and extraction of road networks from high resolution satellite images. *In* Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'03), Barcelona, Spain, 14-17 September 2003 Volume I, pp. 301-304.

PETERI Renaud, CELLE Julien et RANCHIN Thierry, 2003. Contours actifs et analyse multirésolution pour l'extraction de réseaux de rues à partir d'images satellites. Actes du neuvième colloque ORASIS, Gérardmer, France, 19- 23 mai 2003, pp. 393-401.

PETERI Renaud, RANCHIN, Thierry and COULOIGNER Isabelle, 2002. A multiresolution modelling approach for semi-automatic extraction of streets: application to high resolution images from the Ikonos satellite. *In* Proceedings of the 21th EARSeL Symposium, Observing our environment from space: new solutions for a new millenium, Paris, France, 14-16 may 2001, Gérard Begni editor, A. A. Balkema,, Lisse, Abingdon, Exton (PA), Tokyo, pp. 327-332.

PETERI, Renaud and RANCHIN Thierry, 2003. Assessment of road extraction methods from satellite images: reflections and case study on the definition of a reference. *In* Proceedings of 22nd EARSeL Annual Symposium "Geoinformation for European-wide integration", 4-6 June 2002, Prague, Czech Republic. Tomas Benes editor, Millpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 141-147.

- PETERI, Renaud and RANCHIN Thierry, 2002. Extraction and update of street networks in urban areas from high resolution satellite images. *In* Proceedings of ISPRS Commission IV symposium, Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, Canada, 8-12 July 2002, C. Armenakis, Y.C. Lee editors, ISSN 1682-1750, IAPRS & SIS, vol. XXIV, Part 4, Commission IV, pp. 768-773.
- PINSON, Pierre, RANCHIN, Thierry and KARINIOTAKIS Georges, 2004. Short-term wind power prediction for offshore wind farms - evaluation of fuzzy-neural network based models. In CD-Proceedings of the Global Windpower 2004, Chicago, Illinois, USA, March 28-31, 2004.
- POGLIO Thierry, RANCHIN, Thierry, SAVARIA Eric, WALD Lucien, 2001. Simulation d'images dans l'infrarouge thermique par une approche synthétique : spécifications et architecture fonctionnelle. Journée thématique "Coopération Analyse d'Image et Modélisation, 14 juin 2001, LIGIM, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France, pp. 58-61.
- PUISSANT Anne, WEBER Christiane, SERRADJ Aziz and RANCHIN Thierry, 2004. Fusion of Quickbird MS and Pan data for urban studies. *In* Proceedings of the 23rd EARSeL Annual Symposium "Remote Sensing in Transition", 2-4 June 2003, Ghent, Belgium, Rudi Goossens editor, Milpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 77-83.
- RANCHIN, Thierry, FUREVIK, Brigitte, STETTE Morten, WENSINK Han, VAN HULLE Frans, HASAGER Charlotte, JOHNSEN Harald, FICHAUX Nicolas, CHRISTENSEN Lars Christian, SOERENSEN Paul B., HURLEY Brian, 2004. Obtaining data for wind farm development and management: the EO-WINDFARM project. In Proceedings of SeaTech Week 2004, 20-21 October 2004, Brest, France, (CDROM), \3. éolien offshore – gisement\3.5.EOWINDFARM.pdf.
- RANCHIN Thierry and WALD Lucien, 2003. Different implementations of the ARSIS concept to fulfill users needs. *In* Proceedings of the 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas URBAN 2003, Berlin, Germany, 22-23 May 2003, Technical University of Berlin, pp. 299-304.
- RANCHIN Thierry, WALD, Lucien and MAYER, Didier, 2003. Solar and Wind resources estimation: an overview. To appear *in* Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop "Hybrid Solar-Wind Systems: Effective Implementation Conditions", Tashkent, Uzbekistan, 22-24 May, 2002.
- RANCHIN, Thierry and CAUNEAU, François, 1994. Speckle reduction in Synthetic Aperture Radar imagery using wavelets. *In* Proceedings of SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation. Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing. San Diego, California, USA, July 11-16 1993, vol. 2034, pp. 432-441.
- RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1993. Applications of wavelet transform in remote sensing processing. *In* Proceedings of 12th Symposium of EARSeL, Remote Sensing for Monitoring the Changing Environment of Europe, Eger, Hungary, September 8-11 1992, Peter Winkler editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 261-266.
- RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1996. Benefits of fusion of high spatial and spectral resolutions images for urban mapping. *In* Proceedings of the 26th International Symposium on Remote sensing of Environment and the 18th Annual Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, Vancouver, British Columbia, Canada, March 25-29, 1996, pp. 262-265.
- RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1996. Merging SPOT-P and KVR-1000 for updating urban maps. *In* Proceedings of the 26th International Symposium on Remote sensing of Environment and the 18th Annual Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, Vancouver, British Columbia, Canada, March 25-29, 1996, pp. 401-404.
- RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1996. Preparation of SPOT 4 mission: Production of high resolution (10 m) multispectral images using the ARSIS method. *In* Proceedings of 15th Symposium of EARSeL, Progress in Environmental Research and Applications, Basel, Switzerland, September 4-6 1995, E. Parlow editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 175-179.
- RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1997. Data fusion of remotely sensed images using the wavelet transform: the ARSIS solution. *In* Proceedings of SPIE's 1997 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation. Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing V. San Diego, California, USA, July 28-August 2 1997, pp. 272-280.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1997. Fusion d'images HRV de SPOT panchromatique et multibande à l'aide de la méthode ARSIS : apports à la cartographie urbaine. Actes des sixièmes journées scientifiques du réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF : Télédétection des milieux urbains et périurbains, Liège, Belgique, 2-5 octobre 1995, pp. 283-290.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1997. Sensor fusion to improve spatial resolution of images: the ARSIS method. *In* Proceedings of 17th Symposium of EARSeL, Future trends in remote sensing, Lyngby, Denmark, 17-20 June 1997, Preben Gudmansen editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 445-452.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1999. Fusion of airborne and spaceborne images in visible range. *In* Proceedings of 18th Symposium of EARSeL, Operational remote sensing for sustainable development, Enschede, The Netherlands, 11-14 May 1998, Nieuwenhuis, G.J.A., R.A. Vaughan & M. Molenaar editors, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 255-260.

RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 2000. Comparison of different algorithms for the improvement of the spatial resolution of images. *In* Proceedings of the third conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 26-28, 2000, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 33-41.

RANCHIN, Thierry, 1997. Wavelets, remote sensing and environmental modelling. *In* Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics, August 24-29, 1997, Berlin, Germany, Volume 6: Applications on Modelling and Simulation, pp. 27-34.

RANCHIN, Thierry, 1998. Improving spatial resolution of spaceborne images using airborne images. *In* Proceedings of the second conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 28-30, 1998, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 37-44.

RANCHIN, Thierry, 1999. Wavelets for modeling in remote sensing. *In* Proceedings of SPIE's 1999 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation. Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing VII, Denver, Colorado, USA, A.F. Laine, M.A. Unser and A. Aldroubi editors, July, 19-23 1999, vol. 3813, pp.208-218.

RANCHIN, Thierry, 2001. Data fusion in remote sensing: examples. *In* Proceedings of the 4th international conference on Information fusion, FUSION 2001, Montréal, Québec, Canada, August 7-10 2001, published by Lockheed Martin Canada, Volume 1, ISBN 0-9695628-1-0, pp. WeA1-19 WeA1-25.

RANCHIN, Thierry, COULOIGNER, Isabelle and WALD, Lucien, 1996. Contribution of sensor fusion to urban mapping: application to simulated SPOT 5-6 data. *In* Proceedings of the conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Cannes, France, February 6-8, 1996, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 81-85.

RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien and MANGOLINI, Marc, 1993. Application de la transformée en ondelettes à la simulation d'images SPOT multispectrales de résolution 10 m. *In* Actes du quatorzième Colloque sur le traitement du signal et des images GRETSI, Juan-les-pins, France, 13-16 septembre 1993, pp. 1387-1390.

RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien and MANGOLINI, Marc, 1994. Efficient data fusion using wavelet transforms: the case of SPOT satellite images. *In* Proceedings of SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation. Mathematical Imaging: Wavelet Applications in Signal and Image Processing. San Diego, Californie, USA, July 11-16 1993, vol. 2034, pp. 171-178.

RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien and MANGOLINI, Marc, 1996. Fusion of SPOT panchromatic and multispectral images and computation of the Normalized Difference Vegetation Index at the spatial resolution of 10 m. *In* Proceedings of 15th Symposium of EARSeL, Progress in Environmental Research and Applications, Basel, Switzerland, September 4-6 1995, E. Parlow editor, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 147-153.

RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien and MANGOLINI, Marc, 1996. The ARSIS method: a general solution for improving spatial resolution of images by the means of sensor fusion. *In* Proceedings of the conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Cannes, France, February 6-8, 1996, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 53-58.

RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien, MANGOLINI, Marc and PENICAND, Claude, 1996. On the assessment of merging processes for the improvement of the spatial resolution of multispectral SPOT XS images. *In* Proceedings of the conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Cannes, France, February 6-8, 1996, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 59-67.

RANCHIN Thierry, WALD Lucien, MAYER Didier, 2003. Solar and Wind resources estimation: an overview. To appear in Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop "Hybrid Solar-Wind Systems: Effective Implementation Conditions", Tashkent, Uzbekistan, 22-24 May, 2002.

RAPTIS, Vassilis S., VAUGHAN, Robin A., RANCHIN, Thierry and WALD, Lucien, 1998. Assessment of different data fusion methods for the classification of an urban environment. *In* Proceedings of the second conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 28-30, 1998, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 167-182.

Remund J., Wald L., Lefevre M., Ranchin T., Page J., 2003. Worldwide Linke turbidity information. ISES 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19 June 2003.

TANZI, Tullio Joseph, RANCHIN, Thierry, LAURINI, Robert and GUIOL, Régis, 2002. A dynamic approach in real-time mobile Geographical Information System. *In* Proceedings of the 23th International Symposium of the Urban Data Management Society, "30 years of urban data management: looking back, looking forward, 1-4 october 2002, Prague, Czech Republic, (CD-ROM) pp. V.49-V.66.

THOMAS, Claire, RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien and LANERI, Jean-Christophe, 2005. A modular platform for fusion of images. *In* Proceedings of the Fourth International Conference Physics in Image and Signal Processing PSIP'2005, January 31-February 2 2005, Toulouse, France, ISBN 2-912328-22-5, pp. 269-273.

UNG Anthony, RANCHIN Thierry, WALD Lucien, WEBER Christiane, HIRSCH Jacky, PERRON Gilles, KLEINPETER Joseph, 2003. Air pollution mapping : relationship between satellite- made observations and air quality parameters. *In* Proceedings of the 12th symposium "Transport and Air Pollution", 16-18 June 2003, Avignon, France, pp. 105-112.

UNG A., WEBER C., PERRON G., HIRSCH J., KLEINPETER J., WALD L., RANCHIN T., 2001. Air pollution mapping over a city – virtual stations and morphological indicators. *In* Proceedings of 10th International Symposium "Transport and Air Pollution", September 17-19, 2001 – Boulder, Colorado, USA.

UNG, Anthony, RANCHIN, Thierry, WALD, Lucien, WEBER, Christiane, HIRSCH, Jacky, PERRON, Gilles and KLEINPETER, Joseph, 2002, Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. *In* Actes des 6^{ème} Journées CASSINI 2002 du GDR CASSINI-SIGMA, Presqu'île de Crozon, Brest, 19-20 septembre 2002, pp. 315-336.

UNG, Anthony, WALD, Lucien, RANCHIN, Thierry, WEBER, Christiane, HIRSCH, Jacky, PERRON, Gilles, KLEINPETER, Joseph, 2002. Satellite data for the air pollution mapping over a city – The use of virtual station. *In* Proceedings of the 21th EARSeL Symposium, Observing our environment from space: new solutions for a new millenium, Paris, France, 14-16 may 2001, Gérard Begni editor, A. A. Balkema,, Lisse, Abingdon, Exton (PA), Tokyo, pp. 147-151.

Wald L., Ranchin T., Lefèvre M., Albuissou M., Remund J., 2003, Increasing the spatial resolution of gridded data by fusion with other data sets. *In* Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion, Cairns, Australia, 8-11 July 2003, pp. 168-173.

Wald L., Ranchin T., 2003, The ARSIS concept in image fusion: an answer to users needs. *In* Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion, Cairns, Australia, 8-11 July 2003, pp. 181-184.

WALD, Lucien and RANCHIN, Thierry, 2001. Data fusion for a better knowledge of urban areas. *In* Proceedings of the IEEE/ISPRS joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Roma, Italy, November, 8-9th, 2001, pp. 127-132.

WEBER Christiane, KLEINPETER Joseph et RANCHIN Thierry, 2004. Morphologie urbaine et répartition spatiale des polluants atmosphériques : de la rue à l'agglomération. Colloque Action Concertée Incitative Ville, Paris du 1^{er} au 3 mars 2004.

WEBER Christiane, RANCHIN Thierry, PUISSANT Anne and SERRADJ Aziz, 2003, Extraction of urban features in Strasbourg, France: Comparison of two fusion algorithms for Quickbird MS and Pan data. *In Proceedings of the 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas URBAN 2003*, Berlin, Germany, 22-23 May 2003, Technical University of Berlin, pp. 206-210.

WEBER, Christiane, HIRSCH Jacky, RANCHIN Thierry, WALD, Lucien, UNG, Anthony, PERRON, Gilles and KLEINPETER, Joseph, 2002. Urban morphology and atmospheric pollutants distribution. *In Proceedings of the 23th International Symposium of the Urban Data Management Society, "30 years of urban data management: looking back, looking forward, 1-4 october 2002, Prague, Czech Republic, (CD-ROM) pp.VI.47-VI.60.*

WEBER, Christiane, HIRSCH, Jacky, PERRON, Gilles, KLEINPETER, Joseph, RANCHIN, Thierry, UNG, Anthony and WALD, Lucien, 2001. Urban morphology, remote sensing and pollutants distribution: An application to the city of Strasbourg, France. International Union of Air Pollution Prevention and Environmental Protection Associations (IUAPPA) Symposium and Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE) Symposium, 12th World Clean Air & Environment Congress, Greening the New Millennium, 26-31 August 2001, Séoul, Korea. Abstract: Vol. 1, p. 274, Paper (CDROM).

WEBER, Christiane, HIRSCH, Jacky, SCHNELL, Laurent, PERRON, Gilles, KLEINPETER, Joseph, RANCHIN, Thierry, 2001. Urban fabric and measures of variability neighborhood effects on proximity pollution. International Union of Air Pollution Prevention and Environmental Protection Associations (IUAPPA) Symposium and Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE) Symposium, 12th World Clean Air & Environment Congress, Greening the New Millennium, 26-31 August 2001, Séoul, Korea. Abstract: Vol. 1, p. 275, Paper (CDROM).

YANG, Wunian, CUI, Zhengquan, CAUNEAU, François, RANCHIN Thierry, PARIS, Jean-Pierre and PU Guoliang, 1999. Digital Processing and Information Extraction of the Remote Sensing Images in the Yangtze Three Gorges Project Region, China. *In Proceedings of the International Symposium on Digital Earth, Beijing, China, November 29 - December 2, 1999, Vol. 2, pp. 1008-1020.*

YANG, Wunian, CAUNEAU, François, PARIS, Jean-Pierre, and RANCHIN, Thierry, 2000. Fusion of SAR and SPOT images for the detection of geological features over the Three Gorges Dam site, China. *In Proceedings of the third conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 26-28, 2000, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 137-142.*

YANG, Wunian, CAUNEAU, François, PARIS, Jean-Pierre, and RANCHIN, Thierry, 2000. Influence of landscape changes on the results of the fusion of P and XS images by different methods. *In Proceedings of the third conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 26-28, 2000, Thierry Ranchin and Lucien Wald Editors, published by SEE/URISCA, Nice, France, pp. 47-56.*

YANG, Wunian, PU, G., PARIS, Jean-Pierre, CAUNEAU, François and RANCHIN, Thierry, 2001. Applications of orthophotomap and fusion of Landsat, SPOT, and SAR images in the studies of the events that stop up water flow and affect the ecological environment in the Yangtze Three Gorges Project region. *In Proceedings of the Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space. Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere, Sendai, Japan, October 9-12 2000. vol. 4151, pp. 189-196.*

Annexe 3 : Encadrements d'étudiants

3^{ème} cycle : DEA – DESS – Stages Ingénieurs

DEA

BLANC Philippe, mars – septembre 1995. Applications des transformées en ondelettes au traitement d'images en télédétection. Stage de DEA Signal "Télécommunications Image Radar" de l'Université de Rennes I et mémoire de fin d'études d'ingénieur, ENST Bretagne option "Communication Optiques, Formes et Images".

BASLY Ludovic, février – juin 1996. Apport de l'imagerie radar satellitaire à l'étude du milieu urbain. Stage de DEA "Propagation, Télécommunications et Télédétection" de l'Université de Nice-Sophia Antipolis.

COUVERCELLE Christophe, février – juin 1997. Apport de l'imagerie radar satellitaire pour la classification des structures urbaines. Stage de DEA "Propagation, Télécommunications et Télédétection" de l'Université de Nice-Sophia Antipolis.

DAHON Cyril, février - juin 2000. Evaluation de la ressource éolienne en milieu *off-shore* à l'aide de données radar d'observation de la Terre. Stage de DEA "Propagation, Télécommunications et Télédétection" de l'Université de Nice-Sophia Antipolis.

DESS

VALTONEN Véli Pekka, mars – juillet 1996. Evaluation des potentialités de SPOT 5 pour la cartographie du milieu urbain. Stage de DESS "Télédétection, Méthodes et Applications", GDTA-CETEL/Ecole Nationale des Sciences Géographiques.

YANG Wunian, mars – juin 1999. Apport de l'imagerie satellitaire à l'étude et au suivi géologique du Barrage des Trois Gorges, Chine. Stage de DESS "Télédétection, Méthodes et Applications", GDTA-CETEL/Ecole Nationale des Sciences Géographiques.

RAMBUR Jérôme, avril-septembre 2001. Transformée en ondelettes et Fusion d'images. Stage de DESS "Traitement de l'Information du Capteur à l'Exploitation des données", Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

CELLE Julien, mars-septembre 2002. Utilisation de contours actifs sur des images satellites dans un procédé d'extraction de rues en milieu urbain. Stage de DESS Image et réseaux, Université Claude Bernard, Lyon 1.

CHAIGNAUD Guillaume, mai-août 2002. Modélisation 3D des zones non visibles par une caméra. Extraction des zones d'ombres à l'aide d'ArcGIS. Stage de DESS Compétences Complémentaires en Informatique, Université de Corse, Corte.

Stages Ingénieurs

SINEGRE Lionel, septembre 1996 – août 1997. Recherche des réseaux routiers en imagerie multispectrale et multirésolution. Ingénieur, Scientifique du contingent.

AUFRANC Cécile, mars-août 2000. Influence de la fonction de transfert de modulation sur des images fusionnées. Stage Ingénieur de l'ENSPS (Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg).

MARGIRIER Sylvain, mars-novembre 2002. Evaluation et amélioration des techniques d'extraction combinée vitesse/direction du vent en mer par imagerie radar de la surface marine. Stage de deuxième année d'élève ingénieur, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille.

LANERI, Jean-Christophe, juin-août 2003. Fusion d'Images d'Observation de la Terre. Stage de deuxième année d'ingénieur, ESIEA Paris

Stages non diplômants

CHERIFI Dalila, mars – août 1999. Réduction du chatoiement dans l'imagerie radar à ouverture synthétique et intégration des données satellitaires multisources. Stage pré-doctorat de l'AUPELF-UREF.

KHEDAM Radja, avril-août 2001. Etude et développement de méthodes de classification supervisée contextuelles d'images satellitales. Stage pré-doctorat de l'AUPELF-UREF.

OUARAB Nadia, juin-juillet 2003. Stage doctoral, Université des Sciences et Techniques Houari Boumediene, Alger, Algérie

3ème cycle : Doctorants

COULOIGNER Isabelle, décembre 1995 – septembre 1998. Reconnaissances de formes dans des images de télédétection du milieu urbain, septembre 1998, 130 p. Co-encadrement à 50 % de sa thèse de doctorat 3ème cycle en Sciences pour l'ingénieur de l'Université de Nice - Sophia Antipolis (Directeur de thèse : Lucien Wald).

POGLIO Thierry, mars 2000 - novembre 2002. Synthèse de paysages en infrarouge thermique pour la simulation d'images de télédétection. Co-encadrement à 20 % de sa thèse de sa thèse de doctorat 3ème cycle en Sciences pour l'ingénieur de l'Université de Nice - Sophia Antipolis (Directeur de thèse : Lucien Wald).

FICHAUX Nicolas, octobre 2000 - novembre 2003. Estimation du gisement éolien offshore et observations satellitaires. Encadrement de sa thèse de doctorat 3^{ème} cycle dans la formation doctorale Energétique de l'Ecole des Mines de Paris.

PETERI Renaud, octobre 2000 – décembre 2003. Détection de rues dans des images de satellites à haute résolution. Encadrement de sa thèse de doctorat 3^{ème} cycle dans la formation doctorale Informatique Temps Réel, Robotique et Automatique de l'Ecole des Mines de Paris.

BEN TICHA Mohammed Bassam, octobre 2004 – 2006. Outils satellitaires pour l'évaluation de la ressource éolienne offshore. Encadrement de sa thèse de doctorat 3^{ème} cycle dans la formation doctorale Informatique Temps Réel, Robotique et Automatique de l'Ecole des Mines de Paris.

Annexe 4 : Liste des contrats

Liste des contrats de recherche, formation, consultance, transfert de technologies

Ci-après sont énumérés les contrats pour lesquels j'ai eu la responsabilité de négociation, d'exécution et de suivi.

Développements de méthodes, d'algorithmes et de procédés

1992. Improvement of the resolution of a CCD monodimensional signal. Contrat ACRI/ARMINES, réf. T&M 110-0006.

1994. Fusion d'images KVR et SPOT et cartes saoudiennes. Contrat Aérospatiale/ARMINES, réf. T&M 110-0025.

1994. Fusion d'images. Commande Aérospatiale, réf. T&M 110-0026.

1995. Fusion de données-images-cartes-dessins numérisés-photo en support à des outils informatiques pour l'aide à la décision dans des systèmes. Contrat Aérospatiale/ARMINES, réf. T&M 110-0027.

1995. Fusion de données-images-cartes-dessins numérisés-photo en support à des outils informatiques pour l'aide à la décision dans des systèmes. Avenant au contrat Aérospatiale/ARMINES, réf. T&M 110-0033.

1996. Conception, assemblage puis participation à l'installation d'un système d'analyse d'images satellitaires. Contrat IAS/ARMINES, réf. T&M/110-0036.

1996. Recherche des réseaux routiers en imagerie multispectrale et multirésolution. Contrat DRET/ARMINES n°95-115, réf. T&M 110-0039.

1997. Evaluation studies on the identification of vines using aerial photography. Contrat CCE DG6/ARMINES n°12606-97-02 F1ED ISP F., réf. T&M 110-0049.

1997. Integrated Water Ressources Management System. Contrat CCE INCO-DC/ARMINES, réf. T&M 110-0054.

2000. Contrat Action Concertée Incitative Ville du MENRT. "Morphologie urbaine et répartition spatiale des polluants : de la rue à l'agglomération. Application à la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS)", Université de Strasbourg/ARMINES, réf. T&M 110-

2000. Convention de Recherche ADEME. Etude de faisabilité : Estimation non intrusive de la ressource éolienne en milieu côtier à l'aide d'observations satellitaires, réf T&M 110-0075

2001. Commande DGA – Jeune Chercheur. "Détection de rues dans des images satellites à haute résolution spatiale", réf. Armines 01482.

2001. Contrat de recherche REALIX/CNES. "Evaluation d'algorithmes de fusion d'images", réf. Armines 10272

2002. Contrat de recherche Alcatel Space Industries/CNES. "Recalage d'images", réf. Armines 20754.

2002. Contrat Commission Européenne. "DISPOWER - Distributed Generation with high penetration of renewable energy sources" réf Armines 20935.

2002. Contrat Commission Européenne. ANEMOS- Development of a next generation wind resource forecasting system for the large-scale integration of onshore and offshore wind farms.

2003. Convention ADEME N° 03 05 012. "Estimation non intrusive de la ressource éolienne en milieu côtier à l'aide d'observations satellitaires", réf. Armines 30507.

2003-2006. Contrat ESA /ESRIN 17736/03/I-IW. "EO-Windfarm: EO-Based information service for windfarm management", réf. Armines 31032

2004-2006 Contrat de recherche ADEME – "Outils satellitaires pour l'évaluation de la ressource énergétique éolienne offshore", réf. Armines 40683.

Etudes et stratégie pour l'énergie

2001. Convention ADEME - Marché n°01 07 011. "Etude de définition d'une couche logicielle de SIG pour la MDE", réf. Armines 10732

2001. Convention Assemblée territoriale de Corse (ADEC). "Cartographie du potentiel éolien de la Bonifacio", réf. Armines 10883.

2001. Convention ADEME - Convention n° 01 05 152. "Elaboration du programme pluriannuel de recherche et développement technologique- Filière éolienne", réf. Armines 11172.

2002. ADEME - Marché n°02 05 004. "Définition et mise en place des données et outils pour la réalisation de schémas de programmation régionaux sur l'ensemble de la France", réf. Armines 20573

2003 - 2004. Convention ADEME. "Atlas éoliens français", réf. Armines 31080.

2003. Convention Assemblée territoriale de Corse. ADEC. "Cartographie du potentiel éolien de la Balagne", réf. Armines 30316.

2004-2005 ADEME – Structuration de la recherche française dans le domaine de l'industrie éolienne

Formation

1996. Contrat CCI Marseille. "Formation de cadres du ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire algérien dans le domaine des systèmes d'information géographique", réf. T&M 110-0045.

1997. Contrat IAS. "Formation de personnel "Introduction to image analysis", réf. T&M 110-0046.

1997. Commande AIRCO. Formation : "Introduction aux Systèmes d'Information Géographique", réf. T&M 110-0050.

1997. Contrat IAS Formation de personnel. "Introduction to Geographical Information System", réf. T&M 110-0053

1999. Formation de personnel de la DGA. "Traitement d'images et fusion", réf. T&M 110-0063.

2001. Commande de l'Ambassade du Mali. "Formation de personnel en SIG".

Transfert technologique

1999. Contrat de sous-traitance Fleximage/ARMINES, "Exploitation, Valorisation d'Images Multi-sources", réf. T&M 110-0068

2003. Contrat de sous-traitance EADS. "Fusion de données et optimisation IR", réf. Armines 30715.

2003. Contrat de recherche INTA. "Fusion de données : transfert de technologie", réf Armines 30880.

2004 Contrat de recherche INTA. "Recalage automatique d'images: transfert de technologie", réf. Armines 40682.

Consultance

1997. Contrat GICOS. "Contrat de consultance et soutien technique", réf. T&M 110-0056

1998. Contrat GICOS. "Contrat de consultance et soutien technique", réf. T&M 110-0057

1998. Contrat Aérospatiale. "Couverture Nuage", réf. T&M 110-0060

1999. Contrat GICOS. "Assistance cartographique", réf. T&M 110-0067

2001. Contrat GICOS. "Assistance cartographique", réf. Armines 10795