

*Projet Air**Traitement d'image et données satellites  
dynamiques**Rocquencourt*

THÈME 3B

 *Rapport  
d'Activité*

2002



# Table des matières

<b>1. Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentation et objectifs généraux</b>	<b>1</b>
<b>3. Fondements scientifiques</b>	<b>2</b>
3.1. Mouvement.	2
3.2. Déformation.	2
3.3. Estimation de paramètres.	2
3.4. Assimilation de données.	3
<b>4. Domaines d'application</b>	<b>3</b>
4.1. Panorama.	3
4.1.1. Inputs pour la qualité de l'air.	3
4.1.2. Détection de changements.	4
4.1.3. Hydrologie.	4
<b>6. Résultats nouveaux</b>	<b>4</b>
6.1. Détermination de régions précipitantes dans les images infrarouges Météosat en utilisant des outils multiéchelles	4
6.1.1. Présentation	5
6.1.2. Analyse multifractale d'images infrarouges	5
6.2. Segmentation de structures invariantes dans les changements d'échelle.	6
6.3. Analyse causale du mouvement des images	6
6.4. Formulation variationnelle de l'estimation de paramètres radiatifs	8
6.5. Détection de changements structurels sur couple d'images SPOT	9
6.6. Utilisation des ondelettes pour la détection des changements de couverture végétale	11
6.7. Estimation de l'érosion à partir de données NOAA-AVHRR	11
6.8. Analyse de l'impact de la pollution sur la croissance de la vigne	12
6.9. Evolution d'une courbe sur une surface. Application à la modélisation d'écoulement sur une pente.	13
6.10. Mise à jour de modèle numérique de terrain au moyen de l'interférométrie RADAR.	15
6.11. Obtention d'une ondelette optimale pour le codage de signaux multi-échelles	15
6.12. Analyse de séries temporelles unidimensionnelles multifractales	15
6.13. Compression des données brutes RSO utilisant les ondelettes	16
<b>8. Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>17</b>
8.1. Actions nationales.	17
8.2. Actions européennes.	18
8.3. Actions internationales.	18
<b>9. Diffusion des résultats</b>	<b>18</b>
9.1. Animation de la communauté scientifique.	18
9.2. Enseignement.	18
9.3. Participation à des colloques, séminaires, invitations.	19
<b>10. Bibliographie</b>	<b>19</b>



# 1. Composition de l'équipe

**Responsable du projet**

Isabelle Herlin [DR]

**Responsable permanent**

Hussein Yahia [CR]

**Assistante de projet**

Christine Anocq [TR, en commun avec M3N]

**Personnel INRIA**

Jean-Paul Berroir [CR]

**Collaborateurs extérieurs**

Dominique Béréziat [université de Paris 6]

Sonia Bouzidi [université d'Evry]

Isaac Cohen [USC, Los Angeles]

Etienne Huot [université de Versailles Saint-Quentin]

Bruno Sportisse [CEREVE, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées]

**Chercheurs post-doctorants**

Milan Jovovic [ARC Thalweg, depuis octobre 2002]

Alexandre Keiko [ARC Comode, jusqu'au 01/02/2002]

Paul-Antoine Michelangeli [ARC Comode, jusqu'au 30/04/2002]

Dharmendra Singh [ERCIM, jusqu'au 31/05/2002]

Antonio Turiel [Cofinancement de la région Ile de France, jusqu'au 01/09/2002]

**Doctorants**

Abdelhakim El Boustani [Télécommunication Research Laboratoires - Canada]

Jacopo Grazzini [Bourse INRIA cofinancée par la région, université de Marne la Vallée]

Fabien Lahoche [GEOSYS, université du Littoral, Dunkerque]

**Stagiaires**

Gilson Costa [université UERJ - Brésil]

Jimena Costa [université de Cordoba - Argentine]

Thomas De Smit [université Pierre et Marie Curie - Paris]

Marcelo Fragoso [université UERJ - Brésil]

Ahmed Habbani [université d'Evry]

Till Isambert [ESIEA - Paris]

Youcef Mokhtari [université Paris 13 - Villetanneuse]

Anne-Laure Nicoli [université Pierre et Maris Curie - Paris]

Amandine Robin [université de Cachan]

German Torres [université de Cordoba - Argentine]

## 2. Présentation et objectifs généraux

Le projet AIR s'intéresse à la formalisation mathématique des phénomènes image observés sur les données satellitaires. Le choix des problèmes étudiés se fait en collaboration avec des scientifiques (agronomes, géologues, hydrologues, météorologues, océanographes, spécialistes en pollution, ...) qui souhaitent utiliser les observations terre-mer-atmosphère en complément ou en remplacement d'autres types de mesures. Les activités de recherche méthodologiques s'organisent ensuite autour de trois grandes approches :

1. L'analyse des images pour la détection et le suivi de structures ; l'estimation de grandeurs physiques par résolution de problèmes inverses à partir des acquisitions, ...

2. L'interaction entre les données satellitaires et les modèles physiques des phénomènes étudiés, afin d'appréhender les problèmes de condition aux limites, d'estimation de paramètres des modèles d'assimilation de données dans les modèles. Ce travail s'effectue en collaboration étroite avec le laboratoire CEREAS de l'ENPC.
3. L'intégration de processus génériques de traitement d'images, la publication de données et de programmes dans un environnement distribué sur le web ; ce travail s'effectue principalement en collaboration avec le projet CARAVEL.

## 3. Fondements scientifiques

### 3.1. Mouvement.

**Mots clés :** *champ de vecteurs, flot optique, méthode variationnelle, physique statistique, spline.*

Le projet étudie les phénomènes dynamiques présents dans les données satellitaires. Bien entendu, la nature des données et de l'information recherchée par les utilisateurs est prise comme contrainte pour l'élaboration des solutions. Une des premières étapes concerne l'estimation et l'interprétation du mouvement apparent présent sur ces données. Dans la littérature, des travaux, devenus classiques, ont été effectués sur le problème de l'estimation du mouvement selon l'hypothèse du flot optique, avec une résolution par méthode variationnelle. Une adaptation de ces méthodes à la spécificité des données et des structures étudiées conduit à étudier les fonctions de régularisation. Nous avons tout d'abord étudié le cas de fonctions non quadratiques et nous abordons le cas de régularisation incorporant le modèle de transfert radiatif dans le processus d'acquisition des données. D'autres travaux méthodologiques, effectués dans ce contexte, abordent le problème de la généralisation de l'équation du flot optique, en ajoutant des contraintes spécifiques telles que la conservation volumique dans le cas de structures nuageuses. Des approches couplées sans modèle a priori / avec modèle a priori ont été réalisées afin d'appréhender la nature hiérarchique des composantes du mouvement. Certains phénomènes dynamiques (ex : l'évolution temporelle des structures océanographiques) nécessitent une modélisation globale de structures en interaction (fronts, tourbillons). Nous avons, par ailleurs, développé une méthode de modélisation basée sur le théorème des champs de vecteurs splines et nous étudions son extension au problème du suivi. Le projet étudie enfin l'apport de méthodes issues de la physique statistique pour l'étude de certaines données physiques présentes dans les séquences d'images satellites (pluviométrie des nuages en météorologie par exemple). Cette étude débute par l'expérimentation d'un modèle multifractal de diffusion de la luminance à travers un ensemble de pixels dans l'image, pour déterminer certaines zones de turbulence caractéristiques.

### 3.2. Déformation.

**Mots clés :** *caractéristique différentielle, géodésique, mécanique des fluides, surface interpolante.*

Les structures dynamiques présentes sur les images satellites subissent généralement une déformation temporelle importante. De plus, ces structures interagissent parfois entre elles, rendant le problème plus complexe que celui du suivi temporel classique d'une structure à faible déformation sous des hypothèses de conservation de caractéristiques différentielles. Les approches élaborées par le projet sur ce thème concernent, par exemple, la modélisation de la déformation par création d'une surface interpolante et par l'utilisation de courbes géodésiques. Nous nous sommes également intéressés à la généralisation en 3D (par exemple pour des modèles numériques de terrain) des travaux effectués sur les modèles de level-set.

### 3.3. Estimation de paramètres.

**Mots clés :** *fusion de données, modèle physique, modèle statistique.*

Dans le but d'estimer certains paramètres d'entrée de modèles environnementaux, une démarche de modélisation physique du signal mesuré doit être menée. Il s'agit de modéliser la contribution du paramètre considéré

aux différentes mesures satellitaires, puis de calibrer et valider sur des mesures terrain cette modélisation. Pour résoudre le problème d'estimation, le modèle doit être ensuite inversé à partir de séries de mesures de résolutions spatiale et temporelle variées. Les techniques mises en œuvre font appel à la fusion de données et à la modélisation statistique (champ markovien, analyse biais-variance), ou dans certains cas dérivent de méthodes de traitement d'image adaptées pour incorporer les connaissances sur le processus physique de formation du signal et/ou sur les modèles de structures étudiées. Les problèmes inverses sont également abordés par des techniques d'optimisation sous contraintes de critères, dont le gradient est obtenu par modélisation adjointe.

### 3.4. Assimilation de données.

**Mots clés :** *assimilation de données, assimilation de radiances, chimie atmosphérique.*

Les données issues de la télédétection spatiale sont une source d'information de premier plan pour la surveillance de la composition chimique de l'atmosphère, en particulier en ce qui concerne trois applications constituant un enjeu important : le suivi de la déplétion de l'ozone stratosphérique, de l'effet de serre additionnel, et de la pollution de la troposphère. Leur modélisation nécessite l'utilisation de modèles sophistiqués, qui combinent modélisation de la météorologie (modèles de circulation globale ou régionale), de la chimie, et du transport des espèces sous l'action de la météorologie. Dans ce contexte, l'assimilation de données satellitaires est un impératif pour assurer une modélisation réaliste et pour estimer avec précision les conditions initiales. La méthodologie classique consiste à assimiler le produit principal des capteurs atmosphériques, la *colonne totale*, ou masse intégrée verticalement de constituant(s) chimique(s) tel l'ozone. L'avantage est la facilité d'assimilation, étant donnée la nature de ce produit. Par contre, l'obtention de la colonne totale nécessite une étape préliminaire de modélisation inverse de la mesure radiative. L'approche prônée par le projet AIR, en collaboration avec le laboratoire CEREAS de l'ENPC, est l'assimilation directe de la mesure effectuée, autrement dit une radiance, et ce afin d'éviter tout traitement préalable et les erreurs correspondantes. Cela nécessite le développement de modèles couplés chimie-transport-radiatif. A la différence des modèles purement radiatifs, l'enjeu est le développement de schémas numériques compatibles avec la discrétisation du modèle chimique et suffisamment efficaces pour envisager une procédure d'assimilation variationnelle utilisant la différentiation automatique.

## 4. Domaines d'application

### 4.1. Panorama.

La spécificité du projet AIR est d'avoir choisi une application prioritaire : l'étude de problèmes environnementaux par télédétection. Il s'agit principalement de définir des problèmes de recherche en traitement d'images, à partir des requêtes exprimées par les scientifiques des différents domaines. Par ailleurs, les spécialistes de ces applications servent également d'évaluateurs de qualité des résultats obtenus. Le projet AIR a ainsi défini un large réseau de collaborations sur ses différents thématiques d'étude, dont quelques unes sont présentées dans la suite de cette section.

#### 4.1.1. Inputs pour la qualité de l'air.

Ces études sont menées, d'abord dans le cadre du groupe de travail ERCIM « modélisation environnementale » -et plus particulièrement avec l'équipe SAS du Fraunhofer FIRST (Berlin, All.), ensuite dans le cadre du projet européen DECAIR (dont la coordination scientifique est assurée par Isabelle Herlin), enfin dans le cadre de l'action de recherche coopérative COMODE, avec l'école des Ponts et Chaussées, le projet IDOPT et le CERFACS. Deux directions de recherche ont été choisies :

- L'estimation de paramètres d'entrée pour les modèles de prévision et de simulation de la qualité de l'air en milieu urbain, en vue de permettre :

- l'amélioration des résultats de prévision par la fourniture de paramètres de « meilleure qualité » ;
  - l'amélioration des modèles proprement dits, par l'estimation objective de paramètres variables dans le temps et l'espace ;
  - l'automatisation de l'implémentation de modèles sur de nouveaux sites.
- L'inversion de modèles radiatifs : les mesures satellitaires s'expliquent physiquement par des modèles de transfert radiatif. L'inversion de ceux-ci permet d'estimer la composition et la structure de l'atmosphère le long du chemin optique. Les applications visées sont, d'une part l'estimation de la composition chimique de la basse atmosphère, d'autre part l'analyse du transfert radiatif à travers les nuages. La première application a un intérêt immédiat pour la modélisation de la pollution, la deuxième permet des études de télédétection sous les nuages, par exemple sur l'ensoleillement exact au sol, et sur la qualité de l'eau de pluie.

#### 4.1.2. Détection de changements.

La cartographie des occupations de sol représente une étape nécessaire et fondamentale pour étudier la couverture végétale et surtout son évolution temporelle. A une échelle locale, la caractérisation des différents types d'occupation peut être obtenue grâce à l'analyse de données à haute résolution spatiale (SPOT, LANDSAT) ou/et de campagnes terrain. Des études ont donc débuté, en particulier en collaboration avec le CESBIO, sur l'analyse de séquences d'images SPOT pour caractériser l'évolution temporelle.

Quand il s'agit d'études à large échelle, par exemple à l'échelle de tout un bassin versant, il est difficile d'obtenir ce type de données sur des surfaces importantes. Une solution consiste donc à exploiter l'information spatio-temporelle offerte par des capteurs à large couverture tels que NOAA-AVHRR et VEGETATION pour effectuer cette cartographie. Dans ce cas, une étude de la composition des pixels à résolution spatiale grossière (1.1 km) est menée afin de générer une cartographie de sol en terme de pourcentage à l'intérieur de chaque pixel. Ces études sont utilisées par exemple pour estimer les risques d'érosion et d'inondation à l'échelle du bassin versant dans le cadre d'une collaboration INRIA/CNPq avec l'université de Rio de Janeiro (projet ECOAIR).

#### 4.1.3. Hydrologie.

Une étude concerne l'estimation des paramètres hydrologiques (température de surface, évapotranspiration) et la caractérisation de leur variabilité en fonction de l'occupation du sol et/ou de la topographie pour plusieurs bassins versants en Afrique australe. Ces paramètres sont ensuite intégrés dans un système de modélisation hydrologique servant pour l'aide à la décision de la répartition des ressources en eau, et pour la simulation de l'impact des changements d'occupation du sol sur les réponses hydrologiques.

Une deuxième étude existe en collaboration avec l'équipe EMA du CETP (Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires). Il s'agit de définir des modèles d'écoulement ou de propagation de front sur des surfaces numériques. Les écoulements peuvent être de divers types (débordement de rivière, écoulement de boue sur une pente,...) et la modélisation étudiée doit prendre en compte la nature du terrain, information obtenue par d'autres sources.

## 6. Résultats nouveaux

### 6.1. Détermination de régions précipitantes dans les images infrarouges

#### Météosat en utilisant des outils multiéchelles

**Mots clés :** *multi-fractalité, pluviométrie, technique multi-échelle, texture.*

**Participants :** Jacopo Grazzini, Antonio Turiel, Hussein Yahia.

### 6.1.1. Présentation

Cette collaboration, dans le cadre de l'ARC Thalweg, a pour but d'extraire des régions précipitantes dans des images acquises sur le canal infrarouge thermique du satellite géostationnaire Météosat. On souhaite, à partir d'une segmentation de ces régions précipitantes, obtenue à l'aide de méthodes originales, être capable de déterminer leur évolution et leurs caractéristiques quantitatives (intensité de la précipitation, vitesse de propagation, etc).

Pour résoudre le problème de la segmentation de la zone de précipitation, on commence par utiliser des techniques d'analyse de la texture, en les modifiant pour les adapter au caractère multi-échelle des données. Cela permet de partitionner les images en plusieurs régions, avec différentes interprétations en termes image et physique. L'analyse multi-échelle, dans son implémentation directe, permet l'analyse des singularités du signal. Utilisée dans un cadre de généralisation des outils classiques, elle se révèle adaptée à ce type de données, probablement à cause des propriétés physiques du système analysé (variable thermodynamique dans un écoulement en turbulence complètement développé, lequel est par conséquent non seulement invariant d'échelle, mais aussi multi-échelle).

Nous disposons pour cette étude de deux types de données. En premier lieu, une séquence d'images Météosat acquises dans le domaine de l'infrarouge thermique, avec une excellente résolution temporelle (1 image toutes les demi-heures). À certaines images de cette séquence correspondent des données TRMM hyperfréquences acquises sur les bandes d'absorption des cristaux de glace au sommet des nuages. Ce deuxième type de données permet de localiser les zones pluviométriques et sert de base d'apprentissage, afin de déterminer quels paramètres d'images IR permettent de détecter les zones pluviométriques.

### 6.1.2. Analyse multifractale d'images infrarouges

Ces travaux ont été initialisés à Madrid avec Néstor Parga et Ángel Nevado, puis à l'ENS dans le Laboratoire de Physique Statistique avec Jean-Pierre Nadal. On a prouvé que les systèmes multi-échelles peuvent être décomposés d'une manière canonique en composantes fractales, dont celle associée à l'exposant le plus singulier (la variété la plus singulière, ou MSM -Most Singular Manifold-) permet la reconstruction de toute l'image en ayant la seule connaissance du vecteur gradient du signal. Après avoir vérifié la validité du modèle multifractal sur les données IR Météosat, nous avons pu constater que la qualité de la reconstruction est exceptionnellement bonne sur ce type de données.

Une analyse des propriétés du vecteur gradient sur la MSM (qui identifie les fronts de mouvement de la transmission thermique), permet de constater que, dans les zones pour lesquelles l'advection est dominante, le gradient reste constant en norme et se trouve toujours aligné dans la direction perpendiculaire à celle du front de transition. Par contre, le long des frontières des régions fortement convectives, le vecteur gradient est beaucoup plus variable. Il est alors possible de définir une nouvelle variable, qui mette en évidence de manière quantitative les régions dont le comportement est convectif. Le premier pas consiste à générer une image dite « réduite » ou « advective ». Cela se fait simplement en introduisant un champ « advectif » (de norme constante et de direction perpendiculaire à la MSM) sur la MSM puis en appliquant la formule de reconstruction. Ensuite on construit un champ qui « mesure » la convection. Ce champ, dit de « sources » dans un autre contexte, peut être appelé dans notre cas « champ de différence de convection ». Ce champ est la dérivée de Radon-Nykodim de la mesure multifractale définie par le champ de gradient de l'image originale par rapport à la mesure obtenue en prenant l'image « advective ». Un tel champ présente des zéros et des pôles situés dans les zones supposées convectives. Sur les images actuellement disponibles, on a pu constater une corrélation entre les zones précipitantes et les foyers convectifs. Nous vérifierons la propriété sur un jeu de données plus important.

Enfin, les propriétés mathématiques du champ de sources ont été étudiées. Il apparaît que ce champ est relié à un produit fini de contributions zéros et pôles de types complexes/anti-complexes. Le logarithme de la norme de ce champ doit donc être harmonique, ce que les données expérimentales confirment avec une grande précision. Il ne manque plus que l'étude de la structure de la phase, harmonique elle aussi, mais plus difficile à élucider en raison du caractère multivalué de celle-ci.

## 6.2. Segmentation de structures invariantes dans les changements d'échelle.

**Participants :** Milan Jovovic, Hussein Yahia.

**Mots clés :** *multi-échelle, multifractals, recuit simulé, segmentation, turbulence.*

M. Jovovic a rejoint le projet Air à partir de septembre 2002 pour un stage post-doctoral dans le cadre de l'ARC Thalweg sur l'étude des signaux turbulents. Dans un premier temps, on étudie les rapports entre la notion de variété la plus singulière, telle qu'elle a été proposée par A. Turiel, et les ensembles de pixels invariants par changement d'échelle.

On introduit un nouveau type de modèle multifractal, pouvant s'appliquer sur des images statiques ou des séquences, basé sur une technique de clustering hiérarchique provenant d'un modèle physique à énergie libre. L'algorithme est envisagé selon deux points de vue :

- la quantification de l'espace des couleurs dans le cas des images multispectrales
- la quantification du mouvement dans le cas des séquences temporelles.

Les calculs sont réalisés sur une fenêtre spatiale adaptative. Pour une valeur de l'exposant d'échelle maximal sur une fenêtre spatiale, (cette valeur est égale à l'énergie de distorsion du signal multipliée par le paramètre d'échelle), le nombre minimal de variétés fractales singulières (multispectrales ou de mouvement) est obtenu par un calcul multi-échelle dans lequel l'arbre binaire des paramètres de clustering est déterminé dans l'algorithme de quantification. La fonction de partition  $Z$ , qui dépend des paramètres d'échelle  $\beta$  et  $r$ , est la suivante :

$$\mathcal{F} = -\frac{1}{\beta} \log_r Z$$

$$Z = r^{-\beta \mathcal{F}} = r^{1 - V_n \beta + o(\beta)}$$

avec  $V_n \beta < \frac{1}{2}$ .

Ce type de calcul hiérarchique (en imagerie multispectrale ou pour les séquences d'images temporelles) conduit à une meilleure résolution spatiale des caractéristiques multidimensionnelles, et nous étudions l'application de cette technique au cas de donnée temporelles. Signalons aussi qu'il y a des applications potentielles pour résoudre des problèmes d'amélioration de la couleur et de reconnaissance de la signature spectrale des signaux. De plus, l'algorithme se formule naturellement dans un contexte de parallélisation. La figure 1 montre les premiers résultats obtenus sur une image Météosat.

## 6.3. Analyse causale du mouvement des images

**Mots clés :** *advection-diffusion, mouvement, traitement causal.*

**Participants :** Isabelle Herlin, Jean-Paul Berroir, Till Isambert.

L'estimation du mouvement des nuages sur des séquences Meteosat est une problématique historique du projet, et reste un problème de recherche majeur, dont l'objectif est de dériver des champs de vents ayant vocation à être assimilés dans des modèles de prévision météorologique. L'objectif de ces travaux est de formuler, dans un cadre de traitement d'image, une approche permettant une meilleure prise en compte de la physique des phénomènes observés ainsi que de la physique du processus d'acquisition. Par opposition aux applications directes de méthodologies issues de la vision par ordinateur (comme par exemple, l'estimation du mouvement par corrélation, ou les méthodes variationnelles d'estimation du mouvement apparent), nous définissons un traitement causal des images Meteosat. Par ailleurs, ces travaux prolongent les études menées précédemment sur l'établissement de nouvelles hypothèses de conservation, adaptées à cette imagerie.

Du point de vue de la physique d'acquisition, les travaux ont visé à exprimer des contraintes portant non pas sur la radiométrie mesurée par le capteur, mais sur des caractéristiques physiques des cibles. Cette interprétation nécessite l'inversion de modèles de transfert radiatif simplifiés, afin d'obtenir :

- dans le canal visible, la réflectance (correction de l'angle de visée et de l'angle solaire),

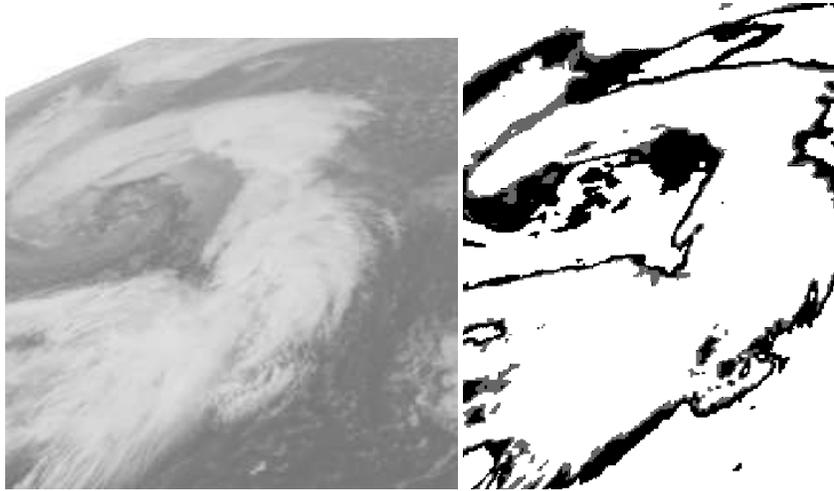


Figure 1. A gauche, l'image Météosat originale, et à droite, l'image des régions formées de pixels obéissant à une loi d'invariance multi-échelle selon le modèle décrit.

- dans le canal infra-rouge, l'altitude (estimation de la température de la cible et application de profils de température climatologiques),
- dans le canal vapeur d'eau, la colonne d'humidité (inversion d'un modèle radiatif simple).

A ce stade, nous sommes à même de reformuler des approches classiques, en utilisant non pas le niveau de gris, mais une grandeur physique dont la conservation temporelle peut être envisagée. Ainsi, l'approche classique de l'estimation du flot optique consiste à supposer la conservation du niveau de gris de chaque pixel au cours de son déplacement. Cette approche a été étendue par D. Béréziat à la conservation de la luminosité totale d'objets. On aboutit dans ce cas à une équation présentant un terme supplémentaire de divergence, qui peut être reliée à des équations de conservation de masse en mécanique des fluides. Nous considérons alors un nuage comme une masse  $C$  en suspension dans un fluide en mouvement, dont la vitesse -le vent- est  $w$ . A ce titre, le mouvement est régi par une équation de transport, de type advection-diffusion : l'advection modélise le transport de la masse par le vent, et est similaire à la contrainte de conservation de la luminosité totale évoquée plus haut ; la diffusion modélise le changement de forme du nuage, et dépend de la turbulence :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(wC) = \text{div}(k\nabla C)$$

Cette équation, dont l'inconnue est le vent  $w$  permet une nouvelle formulation de l'estimation du mouvement apparent, sous l'hypothèse de turbulence  $k$  constante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w\nabla C + C\text{div}(w) - k\Delta C = 0$$

Les deux premiers termes représentent la formulation classique de la conservation du niveau de gris  $C$  (ici,  $C$  représente les grandeurs physiques évoquées plus haut), le troisième terme représente la conservation de la masse d'objets, le dernier terme représente la turbulence, dont la paramétrisation  $k$  est prise constante et horizontale (mais de nombreuses méthodes classiques d'estimation de la turbulence pourraient être mises en œuvre). La résolution fait classiquement appel à une formulation variationnelle, intégrant une contrainte de régularité, qui fournit la deuxième équation nécessaire.

Ces travaux sont en cours de validation, à partir de séquences synthétiques, et par expertise météorologique.

## 6.4. Formulation variationnelle de l'estimation de paramètres radiatifs

**Mots clés :** *estimation de paramètres, formulation variationnelle, transfert radiatif.*

**Participants :** Jean-Paul Berroir, Isabelle Herlin, Amandine Robin, Thomas De Smit.

Cette étude vise à formuler dans un cadre de traitement d'images un problème d'estimation de paramètres, usuellement abordé pour chaque pixel indépendamment. L'objectif est de prendre en compte la nature image des données, notamment en utilisant des contraintes au voisinage de chaque point, afin de régulariser l'inversion du modèle physique expliquant la mesure satellite. L'apport espéré est une meilleure résolution des problèmes inverses radiatifs, notoirement mal conditionnés, et qui font traditionnellement appel à des techniques de régularisation soit ad hoc, soit par utilisation d'estimées a priori provenant de climatologies.

Nous avons développé une approche générique, applicable dès lors que l'on dispose d'un modèle formel expliquant la radiométrie en fonction des paramètres recherchés, et que l'on est à même de calculer le gradient de ce modèle par rapport aux paramètres.

Nous disposons d'une image  $\Omega$  multispectrale, où un vecteur de mesures radiatives  $I$  est disponible en chaque pixel. Nous cherchons à estimer un vecteur  $p$  de paramètres en chaque point, et nous disposons d'un modèle physique  $f$  (typiquement, un modèle de transfert radiatif) permettant d'expliquer la donnée :

$$I = f(p) + \varepsilon$$

Ce modèle est le plus souvent décrit « par morceaux », c'est-à-dire qu'un modèle différent est susceptible de s'appliquer sur différentes parties  $\Omega_m$  de l'image, par exemple, un modèle ciel clair et un modèle par type de nuage.

L'approche choisie est variationnelle : nous définissons une fonctionnelle d'énergie dont l'inconnue est les paramètres sur toute l'image. Cette fonctionnelle est constituée de plusieurs termes.

- Un terme de fidélité aux données, exprimant que les paramètres cherchés sont cohérents avec la donnée image :

$$E_d(p) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (f(p) - I)^T \Sigma_d^{-1} (f(p) - I) dx$$

- Un terme facultatif permettant d'introduire des a priori physiques  $\bar{p}$  sur les paramètres recherchés :

$$E_a(p) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (p - \bar{p})^T \Sigma_a (p - \bar{p}) dx$$

- Un terme effectuant une régularisation spatiale de la solution recherchée. Ce terme est défini par morceaux sur chacune des régions  $\Omega_m$  (autrement dit, une segmentation de l'image en zones où différents modèles s'appliquent. En toute rigueur, cette segmentation est elle-même une inconnue du problème).

$$E_r(p, \Omega_m) = \frac{1}{2} \sum_m \int_{\Omega_m} \nabla^T p \Sigma_r^{-1} \nabla p$$

Il est important de noter que l'opérateur gradient est défini pour chacune des sous-régions, et que ce terme n'introduit pas de contrainte de régularité aux frontières des régions. Techniquement, lors de la dérivation des équations d'Euler-Lagrange, cette formulation impose un gradient des paramètres nul de chaque côté des frontières entre régions.

- Un terme facultatif pénalisant une sur-segmentation de l'image :

$$E_c(\Omega_m) = \frac{1}{2} \int_{\delta\Omega_m} ds$$

Les différentes matrices de covariance  $\Sigma$  introduites ont pour but d'adimensionner les différents termes de l'énergie et de rendre leurs valeurs numériques comparables, afin de pouvoir pondérer chacun de ces termes de manière intuitive pour obtenir l'énergie totale.

La minimisation se fait par descente dans la direction du gradient de l'énergie, lequel fait intervenir le gradient du modèle  $f$  par rapport aux paramètres  $p$ . Elle part d'une initialisation obtenue en fixant une partie des paramètres sur des valeurs physiques, afin d'obtenir un modèle restreint facile à inverser.

A ce jour, ce modèle a été implémenté pour des segmentations  $\Omega_m$  fixes obtenues par analyse préalable de l'image, et pour deux applications :

- L'estimation de paramètres de la couverture nuageuse à partir de données AVHRR, se basant sur un modèle physique proposé par Arking et Childs en 1984. Les paramètres sont, pour chaque pixel, la fraction de couvert, l'épaisseur optique dans le visible, la température du sommet du nuage, et un paramètre microphysique décrivant la taille des particules. Ce dernier paramètre réalise en fait la segmentation de l'image en zones recouvertes par différents types de nuages. Bien que très simplifié, ce modèle a l'avantage de permettre une mise en œuvre de la méthode, car le gradient de  $f$  par rapport aux paramètres est calculable.
- L'estimation de l'ensoleillement au sol, en contrôlant deux paramètres : la transmittivité de l'atmosphère et l'albédo de la surface. Dans ce cas, la segmentation de l'image est faite de deux labels : ciel clair ou ciel nuageux.

Dans les deux cas, le modèle physique est un modèle radiatif simplifié à deux flux, avec une seule couche atmosphérique, homogène horizontalement, qui interagit avec les ondes électromagnétiques. Les résultats, encore en cours de validation, montrent d'ores et déjà une meilleure stabilité du processus d'inversion, et un lissage spatial par zone des paramètres estimés.

Les perspectives concernent, d'une part l'utilisation de modèles radiatifs réalistes, dont le gradient est obtenu par différentiation automatique, et d'autre part la mise en œuvre de stratégies sous-optimales permettant le contrôle de la segmentation dans le processus de minimisation.

## 6.5. Détection de changements structurels sur couple d'images SPOT

**Mots clés :** *classification, détection de changements.*

**Participants :** Isabelle Herlin, Jean-Paul Berroir, Anne-Laure Nicoli.

Cette étude vise à évaluer la possibilité de caractériser les changements de radiométrie, observés sur un couple d'images SPOT acquises sur une même scène à deux dates différentes. Il s'agit de s'affranchir des changements affectant globalement la radiométrie de l'image (liés aux conditions d'acquisition et aux conditions météorologiques), et des changements liés à la variation du couvert végétal (croissance ou récolte des plantes), pour caractériser les modifications liées à l'occupation du sol, ou structurelles, indiquant une modification du paysage (déforestation, changement du bâti). Les applications sont multiples : mise à jour de bases de données image, évaluation de catastrophes naturelles, ...

L'approche proposée utilise une classification préalable du site, qui peut être soit préalablement disponible (cartographie) soit obtenue par classification automatique d'une des deux scènes. On fait alors l'hypothèse que, d'une part, la radiométrie de chacune des classes de sol suit une loi normale à chaque date, et d'autre part, on puisse relier statistiquement les radiométries, observées à deux dates sur une cible n'ayant pas changé d'occupation du sol, par une loi affine, dont les paramètres ne dépendent que de l'occupation du sol.

La première étape consiste à isoler des zones test pour lesquelles le type d'occupation n'a pas changé entre les deux dates. Ces zones test permettent d'apprendre les paramètres du modèle : moyennes et matrices de covariance des loi normales, paramètres du modèle affine et validité de celui-ci.

On utilise ensuite cette loi affine pour prédire, à partir de la classification et de la première scène, une image de radiométrie pour la deuxième date, sous l'hypothèse qu'aucun changement de paysage n'ait eu lieu (voir

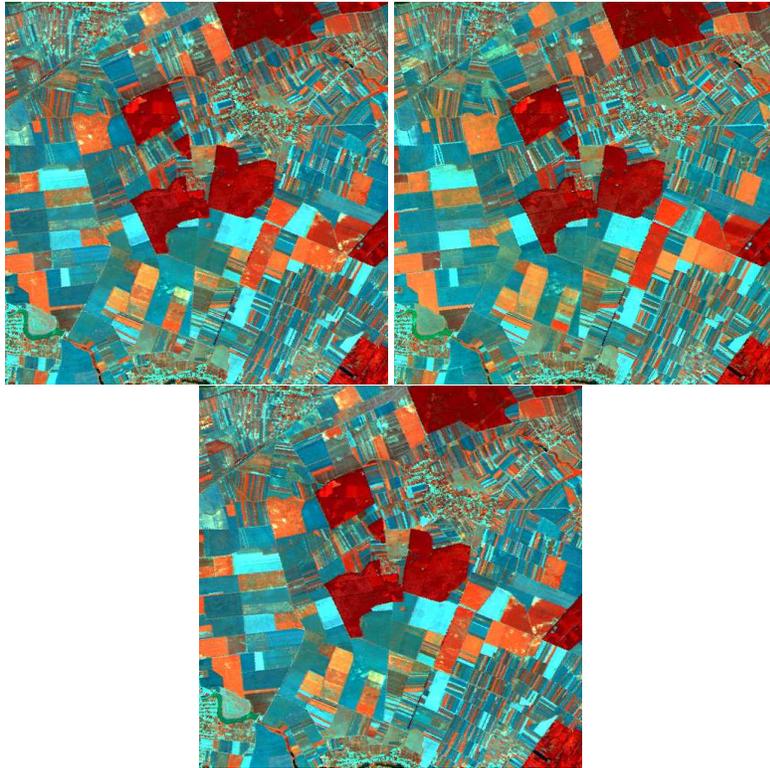


Figure 2. Couple d'images SPOT (13/06/01 et 29/06/01) de la région de Bucarest, image prédite à partir de la première image.

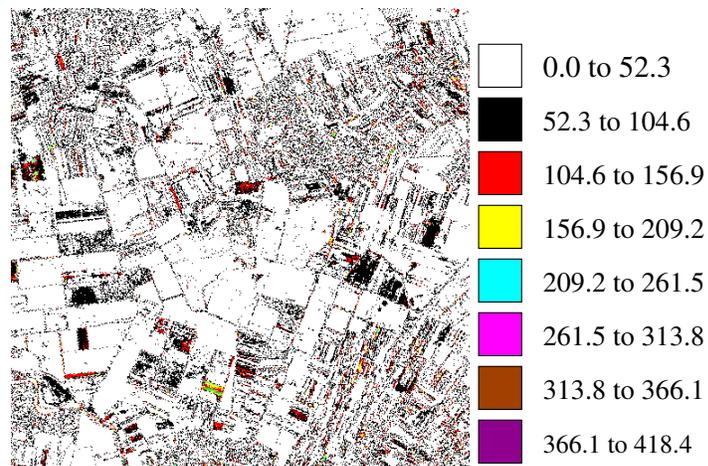


Figure 3. Image des différences entre la prédiction et l'observation.

figure 2). La différence entre la scène réelle et l'image prédite permet de caractériser les zones de changement (voir figure 3, où les changements constatés sont dûs à la couverture nuageuse et à la rotation des cultures).

Les images utilisées comme test, ont été fournies par le CNES depuis la base de données du projet ADAM.

## 6.6. Utilisation des ondelettes pour la détection des changements de couverture végétale

**Mots clés :** *apprentissage, classification, couverture végétale, détection de changement, ondelettes.*

**Participants :** Sonia Bouzidi, Isabelle Herlin, Ahmed Habbani.

Dans le cadre du suivi de l'évolution de la couverture végétale, nous proposons de caractériser les profils de réflectance, liés au comportement temporel et spectral des occupations de sol. L'objectif est d'aboutir à la représentation de ces profils dans un espace de caractéristiques, qui permette une meilleure discrimination des occupations de sol et par conséquent un meilleur suivi de leur évolution.

Nous effectuons d'abord un apprentissage afin de caractériser les courbes de réflectance et de construire l'espace des caractéristiques. Les courbes de réflectance, auxquelles on s'intéresse, sont obtenues grâce à des données satellitaires multi-capteurs. Nous exploitons les données fournies par les satellites basse résolution (NOAA ou VEGETATION) pour extraire l'information temporelle et nous utilisons les capteurs à haute résolution (SPOT ou Landsat) pour la localisation spatiale et pour effectuer une cartographie de la couverture végétale. Le processus de fusion de ces deux types de données se base sur une modélisation des pixels basse résolution dits pixels mixtes, qui présentent généralement un mélange d'occupations de sol. Suite à ce processus, nous obtenons, à chaque date et pour chaque pixel, les réflectances individuelles des différents types d'occupation dans le visible et le proche infrarouge. Ces courbes temporelles permettent de décrire, localement, le comportement de chaque type d'occupation de sol. Pour caractériser ces courbes, la démarche consiste d'abord à extraire des paramètres caractéristiques après une décomposition en ondelettes du signal initial. Une comparaison de ces paramètres, dans les différentes sous-bandes fréquentielles résultant de la décomposition, permet ensuite de choisir les paramètres les plus significatifs ainsi que le niveau de décomposition jugé suffisant pour représenter le signal sans perte d'information. L'étape suivante concerne la définition des classes ainsi que le critère permettant d'affecter un profil temporel de réflectance à une classe de courbes représentant une occupation de sol donnée.

Le résultat de cet apprentissage peut être utilisé dans un contexte opérationnel pour la détection du changement et plus particulièrement la détection de l'érosion. En effet, pour une zone d'étude donnée, on considère une année de référence pour laquelle on applique la phase d'apprentissage précédemment décrite pour obtenir l'espace optimal de représentation. Les profils de réflectances caractérisant les occupations de sol de la même zone d'étude et correspondants aux années suivantes, sont projetés dans l'espace de caractéristiques de l'année de référence. Deux cas peuvent alors se présenter pour un type d'occupation de sol :

- Le nouveau profil appartient à la même classe, dans ce cas on déduit qu'il n'y a pas eu de changement d'occupation de sol.
- Le nouveau profil se rapproche d'une autre classe, dans ce cas un changement est détecté et il faudra l'interpréter. Par exemple, l'observation d'un profil d'herbe ou de culture qui se rapproche de la classe sol nu peut être interprétée par le phénomène d'érosion.

## 6.7. Estimation de l'érosion à partir de données NOAA-AVHRR

**Mots clés :** *couleur du sol, érosion, température, NDVI.*

**Participants :** Dharmendra Singh, Isabelle Herlin, Jean-Paul Berroir, Sonia Bouzidi.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ECOAIR en collaboration avec le CNPq (Brésil). Le but est la mise au point d'un système d'aide à la décision pour la gestion de l'érosion dans le bassin du Pantanal, zone naturelle protégée.

Ces travaux visent à caractériser l'érosion à partir des données AVHRR. Ces données grand champ couvrent une très large zone à la résolution de 1.1km et des acquisitions quotidiennes sont disponibles. On utilise leur riche contenu spectral (rouge, proche infra-rouge, moyen infra-rouge et thermique) pour inférer des informations sur le couvert végétal et sur le sol.

L'approche proposée vise à établir un modèle semi-empirique de détermination de la couleur du sol à partir de la température du sol et du NDVI, ces derniers étant directement dérivés des mesures satellitaires. La couleur du sol est très dépendante de son contenu en matières organiques et minérales d'une part, et de l'importance du couvert végétal d'autre part. Par conséquent, le processus d'érosion sera finalement caractérisé comme un changement de couleur du sol, depuis les couleurs dont la dominante provient du couvert végétal vers les couleurs typiques du sol nu.

L'approche théorique considère le NDVI comme une fonction du climat  $Cl$ , du terrain  $Ph$ , de la végétation et de l'écosystème  $Ve$ , de la nature du sol et de ses caractéristiques hydrologiques  $S$ .

$$NDVI = f(Cl, Ve, Ph, S) + K$$

Les sous-modèles sont alors représentés en fonction de leur composants majoritaires :

$$\begin{aligned} Cl &= f_1(\text{température, humidité, ensoleillement}) + K_1 \\ Ve &= f_2(\text{classe d'écosystème, de végétation}) + K_2 \\ Ph &= f_3(\text{altitude, pente, aspect}) + K_3 \\ S &= f_4(\text{humidité, couleur, perméabilité, matières organiques}) + K_4 \end{aligned}$$

Différentes hypothèses simplificatrices sont faites sur la dépendance de ces variables en fonction du lieu et du temps. Ainsi, on suppose par exemple que le modèle décrivant le terrain ne varie pas dans le temps pour un endroit donné, et que le modèle climatique est valide pour la région globale à une date donnée. Il est ainsi possible de séparer les diverses contributions pour au final aboutir à une relation liant le NDVI, la couleur du sol, et la température de surface.

Cette étude théorique a abouti à la définition d'une campagne de mesures sur le terrain pour calibrer cette relation. Les premiers résultats indiquent une bonne corrélation entre NDVI, couleur et température mais font apparaître un besoin complémentaire de données terrain, concernant en particulier l'humidité du sol.

Ces travaux seront poursuivis dans le cadre d'une prolongation de cette collaboration.

## 6.8. Analyse de l'impact de la pollution sur la croissance de la vigne

**Mots clés :** *agronomie, analyse de données, qualité de l'air.*

**Participants :** Isabelle Herlin, Hussein Yahia, Jean-Paul Berroir, Youcef Mokhtari.

Ces résultats sont issus d'une expertise réalisée pour le compte de la société EQUATEUR, expertise dont les objectifs sont d'analyser :

- le lien éventuel entre l'exposition à la pollution de l'air et la croissance de la végétation, par analyse d'indicateurs mesurés sur la plante ;
- la possibilité d'observer ce lien, s'il existe, par analyse d'images satellitaires.

Cette étude doit aboutir à la définition d'un protocole complet permettant d'établir une corrélation entre avance ou retard de croissance dû à la pollution d'une part, et observation par télédétection d'autre part. Le site d'étude est la région Languedoc Roussillon, et la culture concernée, la vigne. Quatre sites tests ont été étudiés, situés de part et d'autre de l'autoroute A9, principal axe routier -et source de pollution- local.

La première phase de l'étude a consisté à mener une analyse statistique (tests d'égalité de moyennes, de variances, analyse de variance) afin de valider ou d'infirmer l'influence de la pollution atmosphérique sur la croissance de la vigne. La pollution, issue du trafic routier, est caractérisée par deux variables qualitatives :

l'exposition relative de la parcelle vis-à-vis du vent dominant et de l'autoroute, facteur renseignant sur une quantité globale de polluants plus ou moins importante, et la distance à l'autoroute, facteur renseignant sur la nature des polluants principaux, ceux-ci étant en effet déposés à distance variable en fonction de leur masse. L'avance ou le retard de croissance est mesuré par divers indices numériques mesurés sur un échantillon de feuilles : longueur de nervure principale, indice d'asymétrie de la feuille, mesures électriques de vitalométrie. Cette première phase permet de conclure sur la pertinence ou non des indices pour la mise en évidence de l'impact de la pollution.

La deuxième phase de l'étude est consacrée à l'analyse de deux scènes Landsat de la zone, dans le but d'essayer de retrouver les effets constatés sur le terrain. Des contraintes liées au protocole -en particulier, le fait de ne pas disposer des coordonnées de chaque mesure- ne nous ont pas permis de mener une étude sur un lien numérique entre mesures radiatives et relevés d'indices foliaires. L'étude conclut sur un bon accord entre les deux modes de mesures, cette conclusion étant tempérée par le fait qu'il est fondamental de pouvoir séparer, dans le signal mesuré par le satellite, les contributions du sol et de la canopée. La vigne présentant une faible densité de canopée, les indices de végétation mesurés par satellite rendent largement compte d'effets dus à la nature du sol.

Un protocole plus complet doit être mis en place, permettant la comparaison de parcelles plus semblables en termes de sols et cépages, et avec plus d'acquisitions d'images satellite afin de pouvoir s'affranchir de la contribution du sol. Le but final de ce nouveau protocole sera alors d'établir des corrélations numériques entre les mesures satellitaires et l'avance ou retard de croissance de la vigne.

## 6.9. Evolution d'une courbe sur une surface. Application à la modélisation d'écoulement sur une pente.

**Participants :** Isabelle Herlin, Etienne Huot, Hussein Yahia.

**Mots clés :** *Cartes de distance, contours actifs, distance géodésique, environnement, hydrologie, modèles déformables, opérateur de Hodge.*

Ce travail s'inscrit dans la suite du modèle général de propagation de sous-variétés de codimension 1, présenté antérieurement. L'un des résultats principaux se trouve dans l'équation générale donnant la loi d'évolution d'une sous-variété de codimension 1,  $\Xi_t$ , plongée dans une variété  $X$ , de telle manière que, pour tout  $t$ ,  $\Xi_t$  soit située à distance géodésique  $t$  d'une sous-variété initiale de  $X$ . Ce résultat a été formulé dans un contexte général de dimension quelconque, et de plus, pour une métrique riemannienne elle aussi générale, grâce à l'introduction de l'opérateur de Hodge [6].

Il est donc à présent possible de débiter une série de travaux destinée à montrer les nombreuses applications potentielles du résultat précédent, et nous continuons cette année les applications à l'hydrologie envisagées dans le rapport d'activité de l'année 2001.

Dans cette étude, on considère une surface  $S$  (construite par exemple à partir d'un modèle numérique de terrain), ainsi qu'une courbe initiale  $\mathcal{C}_0$ , tracée sur  $S$ , représentant la localisation initiale d'un front de propagation. On veut modéliser la propagation du front  $\mathcal{C}_0$  sur la surface  $S$  de manière à simuler la propagation d'un écoulement. La modélisation doit évidemment prendre en compte la pente locale de la surface, ainsi que d'autres caractéristiques locales de terrain. Dans l'état actuel de nos travaux, on intègre ces caractéristiques par une modification de la métrique locale, ce qui se fait directement à partir du modèle général cité plus haut car celui-ci est écrit dans un contexte riemannien général. Dans ces conditions, désignons par  $\mathcal{C}_t$  le front de propagation à l'instant  $t$ ,  $\alpha_t(s)$  une paramétrisation de  $\mathcal{C}_t$  ( $s$  : abscisse curviligne sur le contour),  $N$  la normale à  $S$ , et  $\tau$  le vecteur unitaire tangent à  $\mathcal{C}_t$ . On définit une métrique dans l'espace de façon à ce qu'un extrêmu local de  $S$  induise une vitesse de propagation nulle du contour  $\mathcal{C}_t$ , et qu'inversement une pente élevée augmente la vitesse de propagation. On considère donc la métrique de matrice :

$$\begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 \\ 0 & \rho & 0 \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix}$$

avec

$$\rho = \left\| \frac{\partial S}{\partial z} \right\|$$

On voit alors que, si  $x$  et  $y$  sont deux vecteurs de  $\mathbf{R}^3$ , leur image par l'opérateur de Hodge vaut :

$$*(x \wedge y) = \sqrt{\rho}(x \otimes y)$$

$x \otimes y$  désignant le produit vectoriel usuel dans l'espace. Ceci étant acquis, on modélise la propagation du front  $\mathcal{C}_t$  sur la surface  $S$  en utilisant le schéma d'évolution d'une courbe précédent, ce qui conduit à l'équation :

$$\frac{\partial \alpha_t}{\partial t} = *(N \wedge \tau)$$

expression dans laquelle l'opérateur de Hodge est calculé à l'aide de la métrique précédente. On montre, figure 4, un résultat d'évolution. On constate que l'écoulement est correctement modélisé : l'espace entre deux iso-contours est plus grand dans les zones de plus grande pente, et le contour se stabilise sur les régions plates.

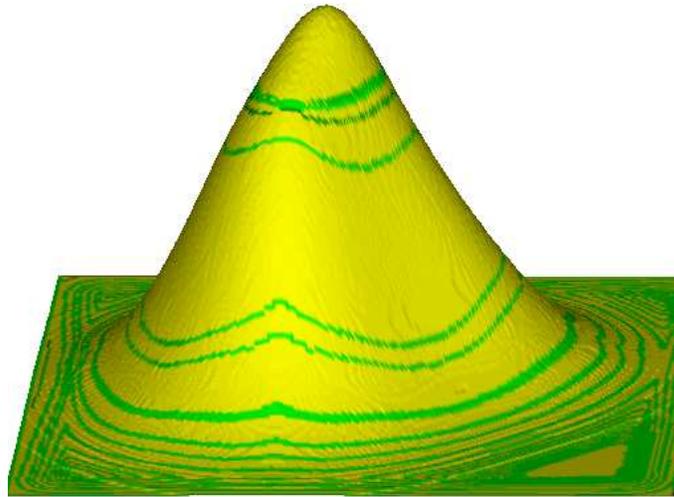


Figure 4. Représentation de l'évolution d'un front sur une surface.

## 6.10. Mise à jour de modèle numérique de terrain au moyen de l'interférométrie RADAR.

**Participants :** Dominique Béréziat, Isabelle Herlin, Hussein Yahia.

**Mots clés :** *formulation eulérienne, image SPOT, interférogramme, MNT, surface déformable.*

Nous continuons les recherches concernant l'amélioration d'un Modèle Numérique de Terrain à partir de données interférométriques. Il s'agit d'améliorer un modèle numérique de terrain imprécis à l'aide d'un interférogramme radar. Nous développons deux méthodologies, la première est basée sur la généralisation des contours actifs au cas des surfaces, et la seconde utilise des outils de mise en correspondance. Nous avons principalement travaillé sur la première formulation, qui s'exprime mathématiquement sous la forme d'un problème de minimisation d'énergie :

$$E(z) = \int_{\Omega} (\nabla z)^2 + (\nabla^2 z)^2 + \|z - h\|^2 + \|\nabla \mu \wedge \nabla z\|^2$$

( $h$  : MNT initial,  $\mu$  : données d'interférogramme,  $z$  : graphe de la surface active). Les essais réalisés montrent que la résolution numérique peut être délicate, lorsque les données originales sont très bruitées. Nous recherchons donc une extension du modèle dans le cadre de « surfaces actives géodésiques » pour améliorer la qualité des résultats.

## 6.11. Obtention d'une ondelette optimale pour le codage de signaux multi-échelles

**Mots clés :** *codage optimal, compression, ondelettes, système visuel.*

**Participants :** Jean-Pierre Nadal, Néstor Parga, Antonio Turiel.

Ce travail entre dans la suite des recherches menées par A. Turiel au sein du Laboratoire de Physique Statistique, en collaboration avec Jean-Pierre Nadal et le prof. Néstor Parga. Le but de ce sujet de recherche est d'exploiter les propriétés d'invariance d'échelle, et plus particulièrement des propriétés multi-échelles des images naturelles pour trouver une représentation optimale dans une base d'ondelettes (dyadique) convenablement choisie. Par optimale, on entend ici une base qui permette de réduire au minimum les redondances mutuelles entre les coefficients d'ondelette. On a prouvé qu'une telle base existe et qu'elle est unique une fois que l'on exige l'indépendance entre les différents niveaux de résolution. De plus, une telle base peut être apprise à partir d'un échantillon d'images d'apprentissage, en utilisant une formule constructive, extrêmement simple.

On avait remarqué que, même si la base avait des propriétés significatives (orthogonalité, indépendance du spectre des puissances vis-à-vis de la définition de l'ondelette, comportement semblable à celui d'un détecteur de bords...), elle n'est par contre pas complète. Il fallait donc généraliser le schéma pour inclure d'autres types d'ondelettes, qui en particulier prennent en compte une notion d'orientation. On a alors prouvé que l'ondelette calculée en premier lieu n'est qu'une combinaison linéaire des différentes ondelettes orientées. Avec une hypothèse supplémentaire d'orthogonalité mutuelle, on a pu étudier les ondelettes orientées et construire enfin une base complète (notamment, à deux orientations).

Pour finir, il faut remarquer que la propriété fondamentale utilisée dans cette étude est l'existence d'un comportement multi-échelle. Or, une grande quantité de systèmes physiques possèdent cette propriété, et notamment les images IR que nous étudions. Il serait alors intéressant d'essayer d'appliquer ce schéma aux images météorologiques. Non seulement il fournirait une méthode de codage très compacte, mais aussi un bon analyseur des régularités statistiques. On n'a pas encore progressé dans cette voie faute de temps, mais les données étant disponibles, il faudrait envisager de l'explorer dans l'avenir.

## 6.12. Analyse de séries temporelles unidimensionnelles multifractales

**Mots clés :** *chaînes de Markov, ondelettes, séries temporelles, systèmes multi-échelle.*

**Participants :** Conrad Pérez-Vicente, Antonio Turiel.

On s'intéresse ici à l'extension des techniques d'analyse multi-échelle, voir multifractale, aux séries temporelles de type multifractal, et plus particulièrement aux séries de cours en bourse des actions de grandes compagnies. Les séries temporelles forment un objet dont l'étude est plus simple que celle des images, car ce sont des systèmes unidimensionnels. A cause de cela, on a découvert l'existence de chaînes de Markov, qui expliquent la formation de la structure multifractale de ces séries. Il est très probable que les systèmes à plus grande dimensionalité ont aussi une telle structure de chaîne de Markov, mais la présence de degrés de liberté supplémentaires complique leur étude ; en ce sens, ces systèmes unidimensionnels constituent un bon laboratoire d'expérimentation qui permettra de mieux comprendre la structure statistique de la multifractalité pour la généraliser aux sujets relevant plus directement des problématiques du projet AIR.

### 6.13. Compression des données brutes RSO utilisant les ondelettes

**Mots clés :** *compression, données RSO, ondelettes.*

**Participants :** Abdelhakim El Boustani, Antonio Turiel, Etienne Huot, Kalen Brunham, Witold Kinsner.

Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) est une technique très sophistiquée capable de produire des images de haute résolution indépendamment des conditions climatiques. Quand un tel radar est placé dans un satellite, la compression du signal brute RSO est nécessaire pour réduire la grande quantité des données collectées, avant de pouvoir les transmettre au sol. Plusieurs méthodes de compression des données brutes ont été proposées auparavant. La plus reconnue et utilisée est le BAQ (*Block Adaptive Quantization*). BAQ a été utilisé pour la première fois pour la mission MAGELLAN. Elle utilise une quantification scalaire contrôlée par la statistique du signal issu d'un RSO, voir Kwok[29]. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, toutefois sa performance reste modeste et d'autres techniques, combinant BAQ avec la quantification vectorielle, ont été élaborées, Benz[28]. Dans ce travail, nous proposons un système de compression des données brutes RSO basé sur la transformée en ondelettes. Plus précisément, nous utilisons les ondelettes de Haar, Battle-Lemarié (linéaires et quadratiques) et celles de Daubechies (D4 et D20). Nous prenons avantage de l'analyse multirésolution pour utiliser différents quantificateurs pour chaque bande fréquentielle des coefficients d'ondelettes. Nous utilisons une analyse en ondelettes séparables et dyadiques en dimension 2. Donc, pour une analyse Multi Résolution (AMR) déterminée par une fonction d'échelle  $\varphi$  et l'ondelette associée  $\psi$ , l'AMR en dimension 2 sera déterminée par la fonction échelle  $\phi$  et trois ondelettes mères  $\Psi^0$ ,  $\Psi^1$ ,  $\Psi^2$  données par :

$$\begin{cases} \Phi(x, y) &= \varphi(x)\varphi(y) \\ \Psi^0(x, y) &= \varphi(x)\psi(y) \\ \Psi^1(x, y) &= \psi(x)\varphi(y) \\ \Psi^2(x, y) &= \psi(x)\psi(y) \end{cases} \quad (1)$$

Si la plus petite échelle est notée par  $N$ , alors la reconstruction du signal est donnée par :

$$C(x, y) = \sum_{j=0}^N \sum_{k,m=0}^{2^j-1} \sum_{i=0}^2 \alpha_{j,k,m}^i \Psi_{j,k,m}^i(x, y) \quad (2)$$

Dans cette décomposition, où on a négligé l'approximation la plus grossière, le signal est représenté par les niveaux successifs de détails, du plus grossier au plus fin. Les coefficients d'ondelettes sont calculés à partir de filtres miroir en quadrature, composés d'un filtre passe-bas et un filtre passe-haut. Dans le système de compression, chaque coefficient est quantifié en utilisant un nombre différent de bits, dans le but d'avoir une distortion minimale du signal reconstruit. La stratégie adoptée dans ce travail consiste à assigner  $b_i$  bits au coefficient  $i$ , où  $b_i$  est donné par :

$$b_i = \frac{B}{K} + \log \frac{\sigma_i^2}{\left(\prod_{i=1}^K \sigma_i^2\right)^{\frac{1}{K}}} \quad (3)$$

et  $\sigma_i^2$  est la variance estimée du coefficient  $i$ ,  $B$  est le nombre total de bits, et  $K$  est le nombre de coefficients.

La Fig.5 présente l'image originale comparée aux images obtenues après reconstruction et après le traitement des données brutes par un logiciel offert par *SAR Alaska Facilities*. On note que la reconstruction est de grande qualité et qu'il n'y a aucune différence significative entre les différents types d'ondelettes utilisés. Le rapport signal- bruit (SNR) entre les données brutes originales et reconstruites est de l'ordre de 4.35 dB pour une quantification avec 1 bit, 8 dB pour 2 bits et de 14.50 dB lorsqu'on utilise 3 bits par échantillon.

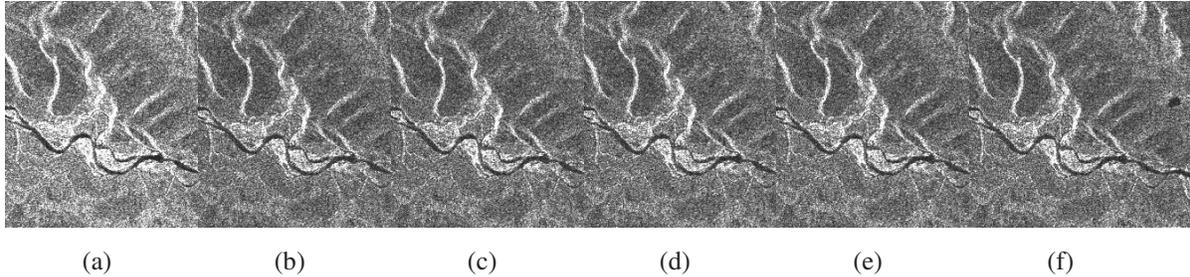


Figure 5. (a) Image originale comparée aux images reconstruites utilisant les ondelettes de (b) Haar (c) Battle-Lemarié linéaire (d) Battle-Lemarié quadratique (e) Daubechies4 (f) Daubechies20.

## 8. Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1. Actions nationales.

De par sa spécificité, le projet AIR a établi différents niveaux de collaboration : avec des laboratoires de traitement d'image, avec des spécialistes des différents domaines d'application en environnement et avec des chercheurs spécialisés en bases de données ou système d'information pour travailler sur l'aspect intégration dans un système de gestion d'un problème environnemental.

Pour les recherches en traitement d'image ou en estimation de paramètres, on peut citer :

- A.R.C. THALWEG, coordonnée par Hussein Yahia, à laquelle participent le laboratoire de Météorologie Dynamique de l'Ecole Polytechnique (LMD), le Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure (équipe Réseaux Complexes et Systèmes Cognitifs), l'équipe ANED (Apprentissage Numérique et Exploration des Données) de l'Université Paris 13-Villetaneuse.
- L'équipe CHPV du laboratoire de Paris VI, coordonnée par Dominique Béréziat.

Des collaborations importantes ont lieu avec les laboratoires suivants :

- Laboratoire de Météorologie Dynamique, Ecole Polytechnique : évolution temporelle de systèmes convectifs, fusion de données infrarouge et hyperfréquence.
- Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure (équipe dirigée par Jean-Pierre Nadal) sur l'étude de la turbulence et les apports de la physique statistique.
- Le CETP : fusion de données, écoulements et propagation de fronts.
- Le CESBIO : évolution de la végétation.

Enfin sur les aspects intégration, une contribution fondamentale provient de la collaboration avec le projet Caravel.

## 8.2. Actions européennes.

L'étude sur l'estimation de données d'entrée pour les modèles de qualité de l'air est menée dans le cadre du groupe de travail ERCIM « *Environmental Modelling* » en étroite collaboration avec l'équipe DYMOS du GMD-FIRST (Pr. A. Sydow, Berlin). Elle a été concrétisée par le contrat DECAIR (environnement et climat), en collaboration avec FhG (All), UPM (Esp), CLRC (GB), FORTH (Grèce), SICE-SA (Esp), BULL-SA, dont la coordination scientifique est assurée par Isabelle Herlin.

Une proposition pour un Network of Excellence, ISEM, est également en cours de préparation.

## 8.3. Actions internationales.

Collaboration avec le laboratoire IRIS de l'University of Southern California. Isaac Cohen, chercheur INRIA du projet AIR, y est en disponibilité et il exerce la fonction de Research Professor dans cette équipe. Une action de recherche sur la détection de changement en imagerie satellitaire est financée dans le cadre de la collaboration NSF-INRIA.

Un projet de recherche, ECOAIR, élaboré dans le cadre de la collaboration INRIA-CNPq, est établi avec différentes universités de Rio de Janeiro au Brésil. Le but est l'obtention d'information sur l'érosion du sol, à partir des données satellitaires, afin de créer un système d'information spécifique pour la gestion du Pantanal au Brésil.

Un projet de recherche, AIRPOL, élaboré dans le cadre de la collaboration entre l'INRIA et le CONICYT (Chili), est établi avec l'université de Santiago et le laboratoire CERREVE des Ponts et Chaussées. Ce projet vise à étudier des méthodologies d'assimilation de données (mesures sol et satellitaires) pour la prévision de la dispersion de l'arsenic.

# 9. Diffusion des résultats

## 9.1. Animation de la communauté scientifique.

Le projet AIR anime, en collaboration avec le Fraunhofer-FIRST, un groupe de travail ERCIM sur le thème « *Environmental Modelling* ». Des workshops ont lieu régulièrement deux fois par an. Dans ce cadre, le projet AIR a accueilli un étudiant post-doctorant Dharmendra Singh. Une proposition PROCOPE a également été soumise et acceptée. Enfin un réseau d'excellence est en cours de préparation.

H. Yahia organise les réunions de travail liés à l'ARC Thalweg (3 journées séminaires en 2002).

## 9.2. Enseignement.

- Étude de cas, « outils de sélection dans Gimp » : 4ème année d'école d'ingénieur, ESIEE, 15h (Jean-Paul Berroir).
- Transfert radiatif : 3ème année et mastère, ENPC, 4h (Jean-Paul Berroir).
- Traitement d'image : 3ème année d'école d'ingénieur, ISTM, 27 heures (Jean-Paul Berroir).
- Traitement d'image : DEA génie biomédical, université de Créteil, 8 heures (Jean-Paul Berroir).
- Cours et Td de programmation structurée en C/C++ : 1ère année d'école d'ingénieur, ISTM, 35 heures (Jacopo Grazzini).
- Probabilité et méthodes statistiques de reconnaissance de formes : 2ème année d'école d'ingénieur, ISTM, 36 heures (Isabelle Herlin).
- Traitement d'image : 5ème année d'école d'ingénieur, ESIEE, 8 heures (Isabelle Herlin).
- Algorithmes et structures de données : école supérieure d'ingénierie Léonard de Vinci, 20 heures (Isabelle Herlin et Hussein Yahia)
- Infographie 2D et Java : 2ème année, école supérieure d'ingénierie Léonard de Vinci, 20 heures (Hussein Yahia et Isabelle Herlin).
- Cours OpenGL : 3ème année d'école d'ingénieur, ISTM, 36 heures (Hussein Yahia).
- Module interfaces Homme-Machine : 3ème année, école supérieure d'ingénierie Léonard de Vinci, 20 heures (Hussein Yahia)
- TP interface homme-machine, 3ème année, école d'ingénieur, ISTM, 18 heures (Hussein Yahia)

### 9.3. Participation à des colloques, séminaires, invitations.

Outre la participation aux conférences figurant dans la liste des publications, les membres du projet ont participé à différents séminaires pour y faire des présentations de leurs travaux :

- I. Herlin : Présentation du projet AIR. Université de Cordoba, février 2002.
- I. Herlin : Présentation des travaux sur la détection de changements. CNES, octobre 2002.
- I. Herlin : Présentation des travaux sur la classification à large échelle. Société Géosys. Toulouse, octobre 2002.
- I. Herlin : Présentation du projet AIR. CESBIO. novembre 2002.
- I. Herlin : Présentation des travaux sur le lien imagerie/pollution. Société EQUATEUR. novembre 2002.
- D. Singh, I. Herlin, and J.P. Berroir : Correlation of NDVI with soil colour and surface temperature : A semi-empirical approach. ECOAIR meeting at INRIA. mars 2002.
- D. Singh : Agricultural Application of Remote Sensing : Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires. Université de Versailles-Saint-Quentin. janvier 2002
- A. Turiel : Multifractal geometry in stock market series. Dans l'atelier « Systèmes Cognitifs et Sociaux », organisé par le Réseau de Sciences Cognitives d'Ile de France. Institut Henri Poincaré. Paris, janvier 2002.
- A. Turiel : Application of multiscale frameworks on satellite images : analysis and physical meaning. Université de Barcelona. Février 2002.
- A. Turiel : Application of multiscale frameworks on satellite images ; analysis and physical meaning. Institut des Sciences de la Mer, CSIC. Barcelone, mars 2002.
- H. Yahia : Normal surface evolution, Application to 3D matching. Argentine, février 2002.
- H. Yahia, A. Turiel, J. Grazzini, M. Jovovic. Communications aux séminaires de l'Arc Thalweg.

## 10. Bibliographie

### Bibliographie de référence

- [1] J. BERROIR, D. BÉRÉZIAT. *Use of image processing and remote sensing techniques to improve input data quality and collection*. in « International Conference on Air Pollution Modelling and Simulation APMS'98 », Elsevier, 1998.
- [2] S. BOUZIDI, F. LAHOUCHE, I. HERLIN, H. STAUDENRAUSCH, V. HOCHSCHILD. *The development of an innovative computer-based Integrated Water Resources Management System for water resources analyses*. in « Systems Analysis Modelling Simulation », 2000.
- [3] I. COHEN, I. HERLIN. *Tracking Meteorological Structures through Curves Matching Using Geodesic Paths*. rapport technique, numéro 3191, INRIA, UR Rocquencourt, Juin, 1997, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3191.html>.
- [4] I. COHEN, I. HERLIN. *Curves Matching Using Geodesic Paths*. in « Proceedings of the conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'98 », IEEE, pages 741-746, Santa-Barbara, USA, June, 1998.
- [5] I. HERLIN. *Spatial Environmental Data*. in « Encyclopedia of Life Support Systems, Eolss, Oxford », 2002.
- [6] E. HUOT, H. YAHIA, I. COHEN, I. HERLIN. *Surface matching with large deformations and arbitrary topology : a geodesic distance evolution scheme on a 3-manifold*. in « Proceedings of European Conference on Computer Vision », Dublin, Ireland, 2000.

- [7] F. LLIRBAT, J.-P. MATSUMOTO, E. SIMON, J.-P. BERROIR, I. HERLIN, H. YAHIA. *Using Scientific Workflow Techniques for Automatic Processing of Environmental Data*. in « System Analysis Modelling Simulation », 2002.

## Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [8] F. LAHOUCHE. *Suivi spatio-temporel de paramètres hydrologiques sur un bassin versant par couplage de données satellitaires*. thèse de doctorat, Université du Littoral, December, 2002, In french.
- [9] H. YAHIA. *Modèles d'évolution spatio-temporelle*. Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 13 - Villetaneuse, mars, 2002, In french.

## Articles et chapitres de livre

- [10] I. HERLIN. *Spatial Environmental Data*. in « Encyclopedia of Life Support Systems, Eolss, Oxford », 2002.
- [11] E. HUOT, H. YAHIA, I. COHEN, I. HERLIN. *Matching Structures by Computing Minimal Paths on a Manifold*. in « Special Issue on Partial Differential Equations in Image Processing, Computer Vision and Computer Graphics, Journal of Visual Communication and Image Representation », numéro 1/2, volume 13, March, 2002, pages 302-312.
- [12] F. LLIRBAT, J.-P. MATSUMOTO, E. SIMON, J.-P. BERROIR, I. HERLIN, H. YAHIA. *Using Scientific Workflow Techniques for Automatic Processing of Environmental Data*. in « System Analysis Modelling Simulation », 2002.
- [13] D. SINGH, K. SINGH, I. HERLIN. *Ground based scatterometer measurements of periodic surface roughness and correlation length for remote sensing*. in « Journal of Advance in Space Research, UK », 2002.
- [14] A. TURIEL, A. DEL POZO. *Reconstructing images from their most singular fractal manifold*. in « IEEE Trans. on Im. Proc. », volume 11, 2002, pages 345-350.

## Communications à des congrès, colloques, etc.

- [15] A. EL BOUSTANI, A. TURIEL, E. HUOT, K. BRUNHAM, W. KINSNER. *Wavelet Transform based compression techniques for Raw sar Data*. in « Proceedings of the IEEE, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE02 », volume 2, pages 857-862, Winnipeg (Canada), May 12-15, 2002.
- [16] D. SINGH, I. HERLIN, J. BERROIR, S. BOUZIDI, F. LAHOUCHE. *An approach to estimate the evapotranspiration over vegetative and bare field using NOAA/AVHRR data*. in « NSSS 2002 », 25-28 February, 2002.
- [17] D. SINGH, I. HERLIN, J. BERROIR, S. BOUZIDI, F. LAHOUCHE. *Semi-empirical approach to assess the evapotranspiration using NOAA/AVHRR data*. in « COSPAR 2002 », October, 2002.
- [18] D. SINGH, I. HERLIN, J. BERROIR, M. SIMOES, E. SILVA. *An approach to correlate NDVI with soil colour for erosion process using NOAA/AVHRR data*. in « COSPAR 2002 », October, 2002.

- [19] D. SINGH, K.-P. SINGH, I. HERLIN. *Ground based scatterometer measurements of periodic surface roughness and correlation length for remote sensing*. in « COSPAR 2002 », October, 2002.
- [20] A. TURIEL, J. GRAZZINI, H. YAHIA. *Entropy Estimation and Multiscale Processing in Meteorological Satellite Images*. in « accepted for the International Conference on Pattern Recognition, ICPR'02 », Québec City (Canada), August 11-15, 2002.
- [21] A. TURIEL, J. GRAZZINI, H. YAHIA. *Multifractal analysis of flows in fully developed turbulence : applications to atmospheric entropy estimation and pluviometry*. in « Proceedings of FisEs 2002 (XI Meeting of Spanish Statistical Physics) », Real Sociedad Española de Física, pages 139, May, 2002.
- [22] A. TURIEL, J.-P. NADAL, N. PARGA. *An algorithm for image representation as independent levels of resolution*. in « Proceedings of the International Conference in Artificial Neural Networks (ICANN) 2002 », série Lecture Notes in Computer Science, volume 2415, European Society of Neural Networks, Springer-Verlag, éditeurs J. DORRONSORO., pages 1213-1218, Berlin, August, 2002.

## Divers

- [23] T. DE SMIT. *Calcul de l'ensoleillement au sol à partir de données METEOSAT*. Mémoire de fin d'étude, DESS, Université Pierre et Marie Curie, December, 2002, In french.
- [24] A. HABBANI. *Classification des courbes de réflectance obtenues à partir des images de télédétection, pour caractériser le comportement temporel d'un couvert végétal*. Mémoire de fin d'étude, DESS, Université d'Evry, September, 2002, In french.
- [25] A.-L. NICOLI. *Détection de changements structurels à partir d'un couple d'images multispectrales SPOT*. Mémoire de fin d'étude, DESS, Université Pierre et Marie Curie, December, 2002, In french.
- [26] A. ROBIN. *Formulation spatiale d'un processus d'estimation de paramètres physiques de nuages*. Mémoire de DEA, Université de Cachan, September, 2002, In french.
- [27] I. TILL. *Analyse causale du mouvement des structures*. Mémoire, 3ème année d'école d'ingénieur, ESIEA, September, 2002, In french.

## Bibliographie générale

- [28] U. BENZ, K. STRODL, A. MORERIA. *A comparison of several algorithms for SAR raw data compression*. in « IEEE Transaction on Geoscience and remote sensing », numéro 5, volume 33, Sept, 1994, pages 1266-1276.
- [29] R. KWOK, W. T. K. JOHNSON. *Block adaptive quantization of Magellan SAR data*. in « IEEE Transaction on Geoscience and remote sensing », volume 27, July, 1989, pages 375-383.