

## *Projet AIR*

*Traitement d'image et données satellites dynamiques*

*Rocquencourt*

THÈME 3B



*R*apport  
*d'Activité*

2001



---

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>3</b>
3.1	Mouvement . . . . .	3
3.2	Déformation . . . . .	3
3.3	Estimation de paramètres . . . . .	4
3.4	Assimilation . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>5</b>
4.1	Panorama . . . . .	5
4.1.1	Cartographie à large échelle . . . . .	5
4.1.2	Hydrologie . . . . .	5
4.1.3	Gestion du littoral côtier . . . . .	6
4.1.4	Qualité de l'air . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>6</b>
5.1	Étude de la turbulence dans les structures nuageuses . . . . .	6
5.2	Mise à jour de modèle numérique de terrain au moyen de l'interférométrie RADAR . . . . .	7
5.3	Mise en correspondance de surfaces . . . . .	9
5.4	Contours actifs géodésiques . . . . .	10
5.5	Estimation de profils verticaux d'espèces chimiques . . . . .	11
5.6	Couplage radiatif-chimie . . . . .	12
5.7	Estimation de l'ensoleillement au sol . . . . .	13
5.8	Fusion de données infrarouges Météosat et hyperfréquences TRMM . . . . .	14
5.9	Classification de l'occupation du sol et relief . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>16</b>
6.1	Actions nationales . . . . .	16
6.2	Actions européennes . . . . .	17
6.3	Actions internationales . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>17</b>
7.1	Animation de la communauté scientifique . . . . .	17
7.2	Comités éditoriaux de conférences . . . . .	17
7.3	Enseignement . . . . .	18
7.4	Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	18
<b>8</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>19</b>

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

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, depuis le 1/09/2001]

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

Alexandre Keiko [ARC Comode, depuis le 01/04/2001]

Paul-Antoine Michelangeli [ARC Comode, depuis le 10/09/2001]

Dharmendra Singh [ERCIM, depuis le 03/09/2001]

Antonio Turiel [Cofinancement de la région Ile de France, depuis le 01/09/2001]

### Ingénieur expert

Dominique Béréziat [jusqu'au 31/08/2001]

### Doctorants

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

Fabien Lahoche [GEOSYS, université du Littoral, Dunkerque]

Sébastien Saunier [Bourse INRIA, université de Cergy-Pontoise, depuis le 01/11/2001]

### Stagiaires

Kimathy Elise [université de Paris 6]

Louis-Pierre Merle [université de Paris Dauphine]

Laurent Saroul [Université de Saint-Etienne]

Sébastien Saunier [université de Cergy-Pontoise]

## 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, ...
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 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 théorie 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

**Mots clés** : Assimilation de données, assimilation de radiance, chimie atmosphérique.

Les données issues de la télédétection spatiale constituent 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 CERREVE 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'applications

### 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.

Actuellement, les collaborations fortes du projet concernent 4 principaux types d'application : la cartographie à large échelle et ses variations temporelles, l'hydrologie, la gestion du littoral côtier et l'étude des paramètres d'entrée pour les modèles de pollution atmosphérique.

#### 4.1.1 Cartographie à large échelle

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. 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).

#### 4.1.2 Hydrologie

Une première étude est effectuée en collaboration avec le département d'hydrologie des universités du Kwazulu-Natal (en Afrique du Sud) et d'Harare (au Zimbabwe) et le département de géographie de l'université de Jena (Allemagne). Il s'agit d'estimer quotidiennement des paramètres hydrologiques (température de surface, évapotranspiration) et de caractériser 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 débute 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.

#### 4.1.3 Gestion du littoral côtier

La gestion du littoral est une application particulièrement importante pour l'environnement. Cette gestion intègre un grand nombre de sources de données, aussi bien images que mesures. Un système de gestion intégrée doit donc aborder de nombreux problèmes : modélisation, traitement d'image, visualisation, méta-données, requêtes, ...

Cette problématique est effectuée en collaboration avec le projet CARAVEL, l'université d'Athènes et un industriel spécialiste des inondations côtières (HR Wallingford, Royaume Uni).

#### 4.1.4 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 satellitales 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 télé-détection sous les nuages, par exemple sur l'ensoleillement exact au sol, et sur la qualité de l'eau de pluie.

## 5 Résultats nouveaux

### 5.1 Étude de la turbulence dans les structures nuageuses

**Mots clés :** mouvement, multifractales, physique statistique, segmentation, suivi



temporel.

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

A. Turiel a développé, au Laboratoire de Physique Statistique de l'ENS Ulm, un modèle multi-fractal de turbulence qui s'applique à des images présentant un certain type statistique de comportement auto-similaire (en particulier en « log-poisson »). Ce modèle permet de reconstruire un signal à partir de certaines données :

- la connaissance de la *variété la plus singulière*,
- la dérivée de Radon-Nykodim de la densité du gradient relativement à l'image dite chromatiquement réduite.

Cette dérivée fournit une information remarquable : elle met en évidence les zones de diffusion de la luminance dans une image. On obtient de cette manière un champ de vecteurs dont les singularités (les points de divergence, et non pas les zéros) renseignent sur la répartition des zones de diffusion « énergétiques » dans une image. Ce champ de vecteurs définit une image dite de « sources », qui représente la diffusion de la luminance dans la variété la plus singulière. De plus, il est possible de classifier ces singularités en considérant l'image des sources comme une fonction de variables complexes (perspective 2002). Nous appliquons ce modèle aux données météorologiques infrarouges fournies par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, Ecole Polytechnique), complétées par une séquence d'images hyperfréquences TRMM, et nous en déduisons l'observation suivante : les zones les plus « chaotiques » dans le signal infrarouge (qui correspondent à une vue de dessus d'un phénomène de convection) sont repérables par des sources d'énergie particulières. Nous voulons donc étudier :

- l'évolution temporelle des zones pluviométriques à partir des sources,
- la caractérisation des zones pluviométriques à l'aide de la décomposition ci-dessus.

Nous montrons, sur la figure 1, une image météorologique infrarouge, et la répartition des sources d'énergie correspondantes.

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

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

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

Ce travail a débuté l'année dernière, et concerne l'amélioration d'un Modèle Numérique de Terrain à partir de données interférométriques. Ce problème peut-être formalisé au moyen d'une surface active, extension au cas tridimensionnel des contours actifs. Dans cette approche, des données imprécises, comme celles obtenues à partir de données stéréoscopiques SPOT, fournissent un modèle numérique de terrain initial sous forme d'une surface. Cette dernière est ensuite déformée sous l'action d'un potentiel de force, calculé à partir d'un interférogramme obtenu par acquisition RADAR. L'interférogramme ne peut pas fournir directement un Modèle Numérique de Terrain, car les valeurs sont obtenues avec un modulo  $2\pi$ . Toutefois, il permet d'extraire certaines données fondamentales, en particulier les lignes d'iso-élevations. Cette in-

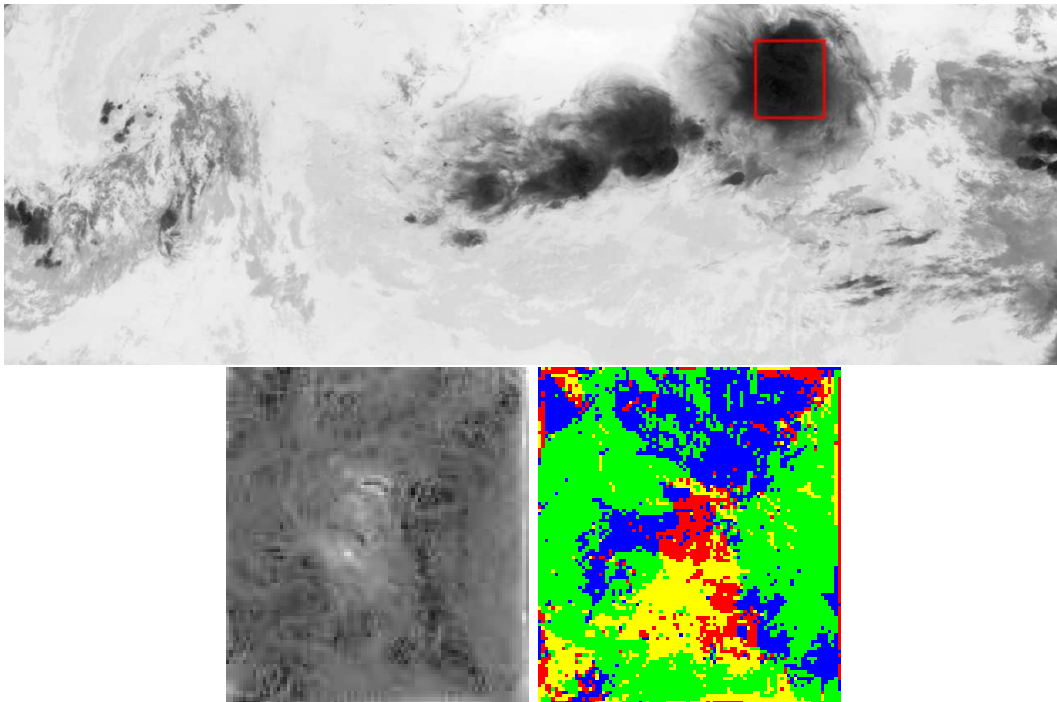


FIG. 1 – En haut : une image Météosat canal infrarouge, renseignant sur la température de brillance des nuages. Une zone délimitée par le rectangle rouge représente une sous-image incluse dans un nuage convectif sur laquelle la décomposition est calculée. En bas : à gauche la détermination des sources d'énergie dans cette imagerie. A droite est représentée la forme vectorielle de la source d'énergie, ce qui permet de caractériser son type (une couleur correspond à une plage de valeurs de la phase).

formation est utilisée pour construire un modèle numérique de terrain plus précis : le potentiel de force utilisé pour déformer la surface initiale, est tel qu'en tout point de la surface résultat, le gradient soit normal à la courbe d'iso-élévation correspondante.

Pour résoudre ce problème, nous définissons deux méthodes. D'une part, nous généralisons l'approche classique des snakes au cas des surfaces. Il s'agit alors de minimiser la fonctionnelle d'énergie ( $h$  : MNT initial,  $\mu$  : données d'interférogramme) :

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

où  $z$  est le graphe de la surface active. On souhaite que la surface résultat interpole le graphe du MNT initial  $h$  de façon telle, qu'en tout point, son gradient soit normal à la ligne d'iso-élévation correspondante  $\mu$ , extraite de l'interférogramme. Cette énergie est minimisée de façon classique en calculant les équations d'Euler-Lagrange associées. Ces équations sont discrétisées puis résolues par un schéma itératif de Gauss-Seidel.

D'autre part, nous étudions également une solution à ce problème basée sur les outils de mise en correspondance de courbes développés les années précédentes dans le projet AIR. Pour chaque ligne d'iso-élévation extraite de l'interférogramme, nous réalisons un ensemble de mises en correspondance avec les lignes d'iso-élévations, extraites du MNT initial, dans un certain voisinage. La mise en correspondance retenue est celle qui minimise les disparités de la fonction de mise en correspondance. La connaissance de la correspondance entre le MNT et l'interférogramme permet alors de lever localement l'ambiguïté  $2\pi$  et de mettre à jour la valeur altimétrique.

### 5.3 Mise en correspondance de surfaces

**Mots clés** : carte de distances, mise en correspondance, morphing, propagation géodésique.

**Participants** : Louis-Pierre Merle, Hussein Yahia, Isabelle Herlin.

Cette étude s'inscrit dans le cadre des recherches menées autour du thème de la mise en correspondance. Nous avons développé, l'année dernière, une méthode originale de mise en correspondance d'objets 3D, basée sur une théorie de propagation de fronts sur une variété, dans leur formulation level-set. Ces techniques permettent, entre autres, de calculer des cartes de distances quelconques sur une sous-variété de codimension 1. Nous cherchons, dans ce travail, à améliorer certains aspects numériques intervenant lors de la résolution des équations aux dérivées partielles nécessaires à la détermination des surfaces à égale distance sur la variété des coûts. En particulier nous étudions :

- comment modifier le schéma de résolution par différences finies sur la grille de pixels pour ne considérer que les points importants pour le calcul,
- comment améliorer la définition de la surface de coût ?

Sur ce dernier point en particulier, nous proposons une nouvelle méthode de détermination des chemins de mise en correspondance, initialisée sur une surface de coût simple, et qui prend en compte la courbure locale des objets, sans avoir à définir globalement une surface de coût intégrant la courbure.

## 5.4 Contours actifs géodésiques

**Mots clés :** contour actif géodésique, segmentation, suivi.

**Participants :** Hussein Yahia, Laurent Saroul, Isabelle Herlin.

Nous avons étudié, généralisé, et développé (en Java 1.3) un outil de segmentation par contour actif géodésique, dans une formulation level-set. Dans cette théorie, la détermination du contour actif ressort d'un calcul de géodésique selon une métrique riemannienne liée à l'information image [CKS95]. L'équation fondamentale, qui est résolue par un schéma explicite sur une grille à la résolution pixel, est :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \|\nabla \phi\| \operatorname{div} \left( g(I) \frac{\nabla \phi}{\|\nabla \phi\|} \right) = g(I) \|\nabla \phi\| k + \langle \nabla g(I), \nabla \phi \rangle, \quad (1)$$

( $\phi$  : potentiel des level-sets,  $g(I)$  : fonction des gradients de l'image  $I$ ,  $k$  : courbure du level-set). De plus, on introduit classiquement un terme jouant pour les contours actifs géodésiques l'analogie d'une force ballon.

Le modèle a ensuite été étendu pour intégrer un aspect scale-space, et il se prête très bien au suivi de structures déformables. En effet, ce modèle possède une propriété intéressante : l'évolution de la courbe se fait selon la direction de la normale, et selon que l'on considère un sens ou l'autre, on obtient une évolution en terme de contraction ou de dilatation du contour. Par conséquent, à partir du contour résultat à l'instant  $t$ , on applique l'algorithme des contours actifs géodésiques dans le sens de la contraction avec une fonction d'arrêt appropriée pour permettre à la courbe de se placer à l'intérieur de la structure à l'instant  $t + 1$ . Ensuite, on applique l'algorithme dans l'autre sens pour obtenir le nouveau contour résultat. De cette manière, on évite de perdre le contour lors du suivi temporel de la structure. Lors de la convergence dans le sens de la contraction, on utilise une approche région au lieu d'une approche frontière. La fonction d'attache aux données utilisée est la suivante :

$$g(I) = 1 - \exp \left( \frac{(I - \lambda)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2)$$

où  $\lambda$  est la moyenne estimée des niveaux de gris des pixels situés sur les bords des structures sur une image lissée,  $\sigma$  est l'écart-type toléré à l'intérieur de la structure, et  $I$  est l'image égalisée et lissée.

Les contours actifs géodésiques sont particulièrement bien adaptés à l'étude des structures ramifiées et hautement déformables, et nous les utilisons pour la segmentation et le suivi des langues sèches, qui sont des structures météorologiques importantes pour l'étude de l'effet de serre. Les météorologues ont établi des modèles, dans lesquels il apparaît que le mélange des masses d'air humides et sèches ne se fait pas immédiatement, mais par l'intermédiaire de phénomènes de filamentation s'étendant sur une échelle spatiale de 50 kilomètres. Les observations satellitaires dans le canal vapeur d'eau (METEOSAT) montrent que ces filaments (filaments

---

[CKS95] V. CASELLES, R. KIMMEL, G. SAPIRO, « Geodesic active contours », *in: International Conference in Computer Vision*, p. 694-699, June 1995.

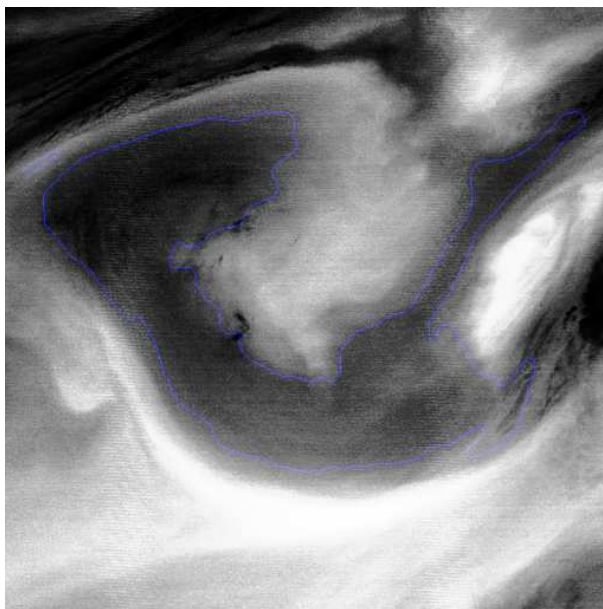


FIG. 2 – Calcul de contour actif géodésique, pour une initialisation interne à la structure et une image égalisée.

humides et langues sèches) sont soumis à des déformations importantes, et peuvent être localement perturbés par des phénomènes de type turbulence. Nous nous intéressons à deux problèmes classiques de traitement d'image sur ce type de données : segmentation et suivi. La figure 2 montre le résultat d'un calcul de contour actif géodésique sur les données METEOSAT vapeur d'eau fournies par le LMD (LABoratoire de Météorologie Dynamique, Ecole Polytechnique).

L'ensemble est intégré dans un logiciel écrit en Java.

## 5.5 Estimation de profils verticaux d'espèces chimiques

**Mots clés** : assimilation de données, colonne totale, différentiation automatique, modèle adjoint, problème inverse, transfert radiatif.

**Participants** : Bruno Sportisse, Jean-Paul Berroir, Isabelle Herlin.

L'estimation de *profils verticaux* d'espèces chimiques (par exemple  $O_3$ ,  $NO_x$ , CO,  $CO_2$ , mais aussi composés organiques et aérosols) est nécessaire à la modélisation de la qualité de l'air, aussi bien globale que régionale. Son obtention par télédétection spatiale ou aéroportée nécessite l'inversion de mesures expliquées par un modèle de transfert radiatif. C'est un problème mal posé.

L'état de l'art dans le domaine est caractérisé par l'utilisation de méthodes numériques réalisant un compromis entre la confiance à la mesure et une régularisation apportée généralement par l'incorporation d'informations a priori, par exemple issues de climatologies.

Une variable néanmoins facile à obtenir par inversion de modèle radiatif est la profondeur optique pour une longueur d'onde observée, qui permet d'obtenir directement la *colonne totale*, ou intégrale de la concentration des espèces le long du chemin optique.

Les travaux menés ont visé à assimiler cette colonne dans un modèle de cinétique chimique, approche possible quand des séries temporelles de mesures radiatives sont disponibles (cas par exemple de la campagne de mesure Esquif, et cas général de la télédétection spatiale). La modélisation adjointe du modèle chimique permet l'assimilation de la colonne totale afin de retrouver la condition initiale.

Les expériences ont confirmé les résultats obtenus l'année précédente avec un modèle chimique simplifié (linéaire) portant sur l'adéquation entre le temps caractéristique de l'espèce assimilée et le temps d'observation : à espèce rapide, observation rapide et inversement. La procédure d'assimilation utilise dorénavant un modèle de chimie 1D réaliste en négligeant toutefois la diffusion -cas pertinent pour un épisode de pollution. La figure 3 illustre un exemple d'estimation de profil vertical d'ozone. Les travaux se poursuivent sur un modèle 3D chimie-transport, afin de converger vers une méthodologie applicable en conditions pré-opérationnelles.

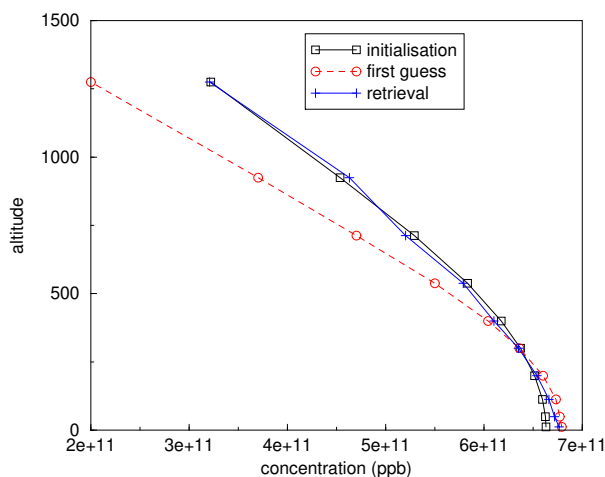


FIG. 3 – Estimation de profil d'ozone par assimilation de la colonne totale dans un modèle de cinétique chimique.

## 5.6 Couplage radiatif-chimie

**Mots clés** : assimilation de données, modèle de chimie-transport, photolyse, transfert radiatif.

**Participants** : Alexandre Keiko, Bruno Sportisse, Jean-Paul Berroir.

La modélisation de la composition chimique de l'atmosphère à différentes altitudes (troposphère pour la qualité de l'air régionale, stratosphère pour le suivi de la couche d'ozone) implique l'utilisation de modèles extrêmement complexes, couplant modélisation météorologique,

chimique, et transport des espèces. L'assimilation de données est une technique majeure pour contraindre ces modèles et retrouver avec précision les conditions initiales.

Les mesures radiatives -comme celles issues des satellites sont une source majeure de données dans ce contexte, mais ne sont pas assimilées telles quelles dans les modèles : on a coutume d'en déduire par modélisation inverse la colonne totale, dont la nature permet une assimilation aisée. Il paraît toutefois important d'être à même d'assimiler la mesure telle quelle, c'est-à-dire, une radiance (en  $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ ). Cela nécessite le développement d'un modèle couplant la chimie et le transfert radiatif, dont les variables d'état sont les concentrations d'espèces chimiques et l'intensité lumineuse pour diverses longueurs d'onde et directions de propagation. La mise en œuvre d'une procédure d'assimilation variationnelle, nécessite alors la production du modèle adjoint.

Les travaux portent sur deux points :

- développement d'un code radiatif « suffisamment réaliste » pour valider l'approche, sans toutefois avoir la complexité d'un code opérationnel. Ce code inclut les principales interactions onde-milieu (absorption, émission et diffusion) et implémente des approximations numériques classiques permettant différentes finesses de modélisation : 2 ou  $n$  flux, ordres successifs de diffusion. Cet aspect devrait être achevé début 2002.
- couplage du code radiatif avec un code de chimie 3D développé par l'ENPC. Le couplage porte sur la compatibilité entre les discrétisations des parties chimiques et radiatives, et sur le couplage physique via les constantes cinétiques des réactions photo-chimiques.

## 5.7 Estimation de l'ensoleillement au sol

**Mots clés :** bilan radiatif, diffusion, environnement, pollution atmosphérique, transfert radiatif.

**Participants :** Kimathy Elise, Jean-Paul Berroir, Isabelle Herlin.

L'ensoleillement incident au sol détermine la cinétique des réactions photo-chimiques, son estimation est donc fondamentale pour une bonne modélisation de la chimie de l'atmosphère. Ces travaux visent à obtenir une méthode opérationnelle utilisant les mesures effectuées par le satellite Meteosat et pas de données annexes -tels les taux d'aérosols. Les résultats seront évalués dans le cadre du projet européen Decair, en les incorporant dans des modèles opérationnels de simulation de la qualité de l'air régionale, et par comparaison avec les résultats obtenus par sources classiques.

Les études portent sur les aspects suivants :

- Méthode de bilan radiatif, considérant uniquement les échanges énergétiques dans le visible entre le soleil, l'atmosphère et les nuages. L'albédo du sol (pris constant sur terre et sur mer) est pris en compte, ainsi que la réflexion multiple entre le sol et la couche nuageuse, simplement caractérisée par une réflectance et une transmittance globale. On aboutit ainsi à un modèle simple permettant de lier la mesure satellite et l'ensoleillement au sol à l'ensoleillement au sommet de l'atmosphère, la réflectance/transmittance des nuages et l'albédo du sol. L'élimination de la réflectance des nuages, ainsi que les hypothèses sur l'albédo du sol permettent alors l'estimation de l'ensoleillement au sol.
- Prise en compte du transfert radiatif dans la couche nuageuse : la méthode du bilan

radiatif est grossière dans la mesure où elle ne considère que les flux ascendants et descendants de lumière, et ne tient pas compte de la complexité de la propagation de celle-ci dans les nuages. Cependant, une telle modélisation est complexe et pose de nombreux défis. Les travaux en cours visent à prendre en compte cette complexité de deux manières alternatives :

- classification de nuages (méthodologies de reconnaissance de formes) et application de modèles ad hoc pour chaque type de nuage ;
- estimation directe de paramètres radiatifs des nuages, et notamment la fraction de couverture nuageuse à l'intérieur de chaque pixel. L'idée est d'essayer alors d'appliquer des modèles radiatifs plus ou moins simplifiés en fonction des paramètres estimés.

## 5.8 Fusion de données infrarouges Météosat et hyperfréquences TRMM

**Mots clés** : classification, fusion, segmentation.

**Participants** : Sebastien Saunier, Hussein Yahia, Isabelle Herlin.

Cette étude aborde des problèmes de segmentation, d'apprentissage et de fusion de données. Le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, Ecole Polytechnique) nous a fourni deux séquences d'images. La première est constituée d'images hyperfréquence (80 GHz), qui mettent en évidence des cristaux de glace au sommet des tours convectives pour des acquisitions au dessus de l'Afrique équatoriale. La présence de ces cristaux est reliée aux précipitations dans le nuage. La seconde est une séquence d'images METEOSAT infrarouge correspondant à une fréquence temporelle d'acquisition de 30 minutes sur la même zone.

Le but de cette étude est de caractériser sur le signal infrarouge, les zones correspondant aux cristaux de glace, à l'aide d'un apprentissage utilisant les données hyperfréquence.

Dans une première étape, nous déterminons, dans le signal infrarouge, un « cœur de région » situé à l'intérieur de la zone de précipitation par seuillage d'une variable appropriée. Cette détermination est effectuée en opérant un apprentissage sur les données hyperfréquence. Un seuillage sur la moyenne donne de bons résultats. Le contour de ce cœur de région sert d'initialisation à un processus de contour actif qui va évoluer jusqu'à une « zone d'arrêt » (processus bloquant) qu'il faut déterminer. Pour déterminer cette zone bloquante, nous utilisons l'information hyperfréquence. En calculant la matrice de cooccurrence sur le signal infrarouge (pour des translations horizontales ou verticales), et en effectuant un seuillage dont la valeur provient du maximum de l'entropie (calculée sur le signal infrarouge) nous obtenons de cette manière une zone, dont le bord représente la frontière de la zone de précipitation. Le contour actif, initialisé sur le cœur de région, va donc évoluer jusqu'à atteindre le bord de la zone bloquante (évolution réalisée sur l'image de cooccurrence, à laquelle nous appliquons un opérateur de diffusion anisotropique pour lisser les irrégularités du signal de cooccurrence). Le modèle de contour actif utilisé est celui donné par la théorie des contours actifs géodésiques, avec une formulation level-sets.

Sur la figure 4, nous montrons l'image hyperfréquence (à gauche), et l'image des cooccurrences (à droite). Sur l'image de gauche nous avons reporté le cœur de région (en bleu), et le bord de la zone d'arrêt. Sur l'image de droite, le cœur de région est en rouge, et nous reportons le bord de la zone d'arrêt, qui correspond effectivement à la frontière de la zone



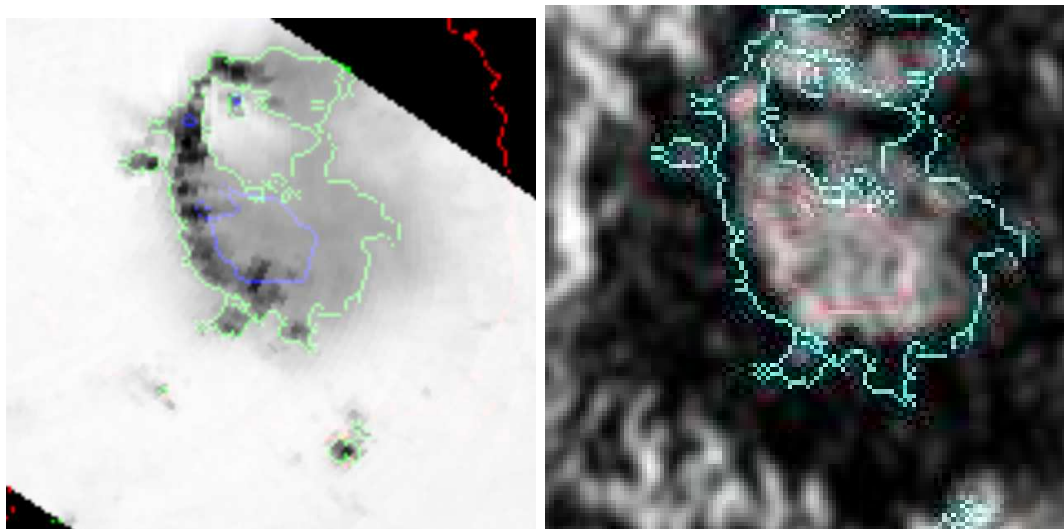


FIG. 4 – A gauche : zone d’initialisation (en bleu) déterminée sur l’image infrarouge et reportée ici sur l’image hyperfréquence. A droite : image des coocurrences, déterminée sur le signal infrarouge. La même zone d’initialisation est ici en rouge.

obtenue par seuillage sur l’image de cooccurrence. Les résultats obtenus par cette étude sont utilisés dans d’autres travaux sur la caractérisation des phénomènes de turbulence en imagerie météorologique.

## 5.9 Classification de l’occupation du sol et relief

**Mots clés :** classification, MNT, occupation du sol, topographie.

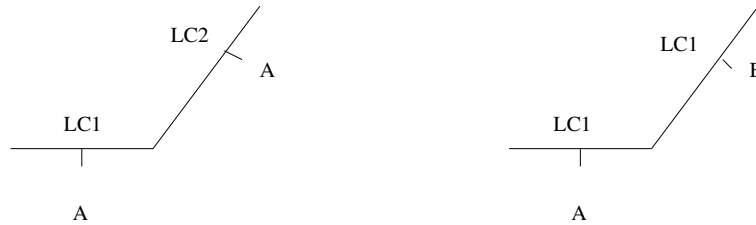
**Participants :** Nadja Benblidia, Fabien Lahoche, Isabelle Herlin.

La classification d’images satellites en types d’occupation de sol est une technique utilisée pour extraire de l’information sur la surface. Dans le cas de régions montagneuses, de type bassin versant, il est nécessaire de tenir compte du relief pour éliminer les effets d’ombre ou de pente. Il est alors nécessaire de posséder un Modèle Numérique de Terrain de même résolution spatiale que l’image (30 mètres pour des images Landsat TM, 20 mètres pour des images SPOT).

Dans le cas d’image de classification sans prise en compte du relief, deux types d’erreur sont prévisibles et décrites ci-dessus :

Même occupation de sol A	Occupations de sol différentes A et B
Valeurs différentes de réflectance	Valeurs identiques de réflectance
Classification en deux types différents	Classification en un seul type d’occupation
LC1 et LC2	de sol LCI

Nous développons une méthodologie pour détecter et corriger ces erreurs. Cette méthodologie nécessite un Modèle Numérique de Terrain de basse résolution spatiale (de l’ordre de la



centaine de mètres), généralement disponible quel que soit le site d'étude. La méthode est la suivante :

1. Segmenter le MNT basse résolution en différents intervalles d'altitude.
2. Sur une zone d'apprentissage, construire l'histogramme des valeurs de réflectance de chaque occupation de sol, à chaque label d'altitude.
3. A chaque label d'altitude, estimer une mesure de distance entre deux occupations de sol différentes caractérisées par des distributions différentes.
4. Fusionner les occupations de sol différentes dont la distance est inférieure à un seuil donné. On crée ainsi, à chaque label d'altitude, de nouvelles classes hybrides.
5. Classifier le reste de l'image selon ces nouvelles classes.

Cette recherche a été menée dans le cadre du projet européen IWRMS.

## 6 Actions régionales, nationales et internationales

### 6.1 Actions nationales

De part 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. COMODE, coordonnée par Bruno Sportisse, à laquelle participent le laboratoire CERMICS de l'ENPC, le CERFACS et les projets AIR et IDOPT.
- 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.

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

## 6.2 Actions européennes

Participation au projet INCO-PED IWRMS [2] en collaboration avec l'Afrique du Sud, le Zimbabwe et le Swaziland. Le but est l'étude d'un bassin versant pour une meilleure connaissance et une meilleure gestion des ressources en eau. Notre contribution concerne l'extraction et la caractérisation de paramètres hydrologiques au moyen de l'imagerie satellitaire. La validation est effectuée par nos partenaires sud-africains.

Participation au projet TELEMATICS THETIS, en collaboration avec le FORTH (Grèce). Il s'agit d'un prototype de système distribué permettant l'interrogation à distance de données variées et hétérogènes (images et programmes).

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 GMD (All), UPM (Esp), CLRC (GB), FORTH (Grèce), SICE-SA (Esp), BULL-SA, et la coordination scientifique est assurée par Isabelle Herlin.

## 6.3 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 université 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.

## 7 Diffusion de résultats

### 7.1 Animation de la communauté scientifique

Le projet AIR anime, en collaboration avec le GMD 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 accueille un étudiant post-doctorant Dharmendra Singh.

### 7.2 Comités éditoriaux de conférences

Isabelle Herlin a été membre du comité de programme de APMS 2001, coorganisé par l'ENPC et l'INRIA sur le thème de la pollution atmosphérique.

### 7.3 Enseignement

- Méthodes de Parallélisme en Imagerie et Optimisation : Maitrisés de Mathématique et d'Informatique, université Paris VI, 36 heures (Dominique Béréziat).
- Étude de cas, « outils de sélection dans Gimp » : 4ème année d'école d'ingénieur, ESIEE, 15h (Jean-Paul Berroir).
- Méthodes statistiques de reconnaissance de formes : 2ème année d'école d'ingénieur, ISTM, 21 heures (Jean-Paul Berroir et Fabien Lahoche).
- Transfert radiatif : 3ème année et mastère, ENPC, 4h (Jean-Paul Berroir).
- Traitement d'image : DEA génie biomédical, université de Créteil, 8 heures (Jean-Paul Berroir).
- Initiation à l'informatique : 1ère année Gestion et Économie Appliquée, université Paris 9 Dauphine, 30 heures (Jacopo Grazzini).
- Cours et Td de programmation structurée en C/C++ : 1ère année d'école d'ingénieur, ISTM, 35 heures (Jacopo Grazzini).
- Td de programmation structurée en C/C++ : 1ère année d'école d'ingénieur, ISTM, 20 heures (Sébastien Saunier).
- Traitement d'image : 3ème année d'école d'ingénieur, ISTM, 50 heures (Isabelle Herlin et Jean-Paul Berroir).
- Traitement d'image : 5ème année d'école d'ingénieur, ESIEE, 8 heures (Isabelle Herlin).
- Infographie 2D et Java : 2ème année, école supérieure d'ingénierie Léonard de Vinci, 30 heures (Hussein Yahia et Isabelle Herlin).
- Synthèse d'image et multimédia : 3ème année d'école d'ingénieur, ISTM, 36 heures (Hussein Yahia).

### 7.4 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 :

- J.P. Berroir : Présentation du couplage transfert radiatif/chimie atmosphérique, Fraunhofer First, Berlin, mai 2001.
- J.P. Berroir : Présentation du couplage transfert radiatif/chimie atmosphérique, Freie Universitaet Berlin, Institut fuer Meteorologie, Berlin, juin 2001.
- D. Béréziat : Estimation du mouvement fluide sur les données météorologiques, LIMSI, université Paris XI, février 2001.
- J. Grazzini : Modélisation et traitement d'images météorologiques, colloquium junior de l'INRIA Rocquencourt, avril 2001.
- E. Huot : Mise en correspondance de structures de dimension  $n$  par le calcul de chemins minimaux sur variété de dimension  $n + 1$ , LIGIM, Lyon, juin 2001.
- I. Herlin : présentation du projet AIR, EMBRAPA, Rio de Janeiro, Brésil, novembre 2001.
- H. Yahia : Séminaire sur les équations de propagation géodésique sur une sous-variété, Université Paris XIII, Institut Galilée, octobre 2001.

## 8 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [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 », *Systems Analysis Modelling Simulation*, 2000.
- [3] I. COHEN, I. HERLIN, « Tracking Meteorological Structures through Curves Matching Using Geodesic Paths », *rapport de recherche n°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, p. 741–746, Santa-Barbara, USA, June 1998.
- [5] 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.

### Articles et chapitres de livre

- [6] I. HERLIN, « Spatial Environmental Data », *Encyclopedia of Life Support Systems, Eolss, Oxford*, 2002.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [7] N. BENBLIDIA, F. LAHOUCHE, I. HERLIN, « Use of topographic information to improve a land cover classification Image Preliminary Results », *in : Proceedings of International Conference on Image Processing ICIP'01*, Thessaloniki, Greece, October 2001.
- [8] J. GRAZZINI, D. BÉRÉZIAT, I. HERLIN, « Analyse de l'évolution de structures nuageuses dans une séquence d'images satellitaires météorologiques », *in : Journées ORASIS'01*, Cahors, France, June 2001. In french.
- [9] J. GRAZZINI, D. BÉRÉZIAT, I. HERLIN, « Analysis of cloudy structures evolution on meteorological acquisitions », *in : Proceedings of International Conference on Image Processing, ICIP'01*, Thessaloniki, Greece, October 2001.
- [10] F. LAHOUCHE, I. HERLIN, « Evapotranspiration mapping using NOAA/AVHRR images and a simplified model of surface energy balance. Application to the Mkomazi river catchment in South Africa. », *in : Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01*, Sydney, Australia, July 2001.
- [11] F. LAHOUCHE, I. HERLIN, « Fusion of Landsat TM, NOAA/AVHRR and DEM data for generating daily high resolution maps of Land Surface Temperature in a semi-arid catchment. », *in : Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01*, Sydney, Australia, July 2001.
- [12] D. QUELO, J.-P. BERROIR, I. CHARPENTIER, B. SPORTISSE, « Some Aspects of Adjoint Modeling for Air Quality Models », *in : Proceeding Air Pollution Modelling Simulation*, Marne-La-Vallée, France, April 2001.

**Divers**

- [13] L.-P. MERLE, *Mise en correspondance de nuages sur des séquences d'images satellitaires*, Mémoire de maîtrise, Université Paris Dauphine, September 2001, In french.
- [14] L. SAROUL, *Détection et suivi de contours nuageux sur des images satellites*, Mémoire de dea, Université de Saint-Etienne, September 2001, In french.
- [15] S. SAUNIER, *Détermination des zones de pluie dans les images infrarouges des nuages tropicaux. Utilisation des signaux hyperfréquences*, Mémoire de dea, Université Cergy-Pontoise, September 2001, In french.