

## *Projet IDOPT*

*Identification et optimisation de systèmes en physique et en  
environnement*

*Rhône-Alpes*

THÈME 4B

*R* *apport*  
*d'Activité*

2001



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>5</b>
3.1	Commande optimale et optimisation de forme . . . . .	5
3.2	Dérivation automatique d'un code adjoint . . . . .	6
3.3	Etude de sensibilité et méthode au second ordre . . . . .	6
3.4	Méthode de décomposition en sous-domaines . . . . .	7
3.4.1	Synthèse modale . . . . .	8
3.4.2	Programmation parallèle . . . . .	8
3.5	Problèmes inverses, ondelettes et méthodes non-paramétriques . . . . .	9
3.6	Filtrage de Kalman . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>12</b>
4.1	Identification et optimisation en physique . . . . .	12
4.1.1	Physique des plasmas . . . . .	12
4.1.2	Capillarité et hydrodynamique du mouillage . . . . .	13
4.1.3	Cristallogenèse . . . . .	14
4.2	Environnement . . . . .	14
4.2.1	Océanographie . . . . .	15
4.2.2	Météorologie . . . . .	17
4.2.3	Hydrologie . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>18</b>
5.1	Maillage adaptatif . . . . .	18
5.2	Identification en temps réel en physique des plasmas . . . . .	18
5.3	Décomposition de domaine . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>19</b>
6.1	Méthode de décomposition en sous-domaines . . . . .	19
6.1.1	Programmation parallèle . . . . .	19
6.1.2	Chimie Atmosphérique . . . . .	19
6.2	Problèmes inverses, ondelettes et méthodes non-paramétriques . . . . .	20
6.3	Méthodes multi-résolution et couplage de modèles en océanographie . . . . .	22
6.4	Assimilation de données en océanographie . . . . .	22
6.5	Sensibilité des attracteurs aux influences extérieures . . . . .	26
6.6	Ecoulements à surface libre . . . . .	27
6.6.1	Surface libre et phénomènes capillaires . . . . .	27
6.6.2	Avalanches et coulées de boue . . . . .	27
6.7	Hydrologie . . . . .	28

---

<b>7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>30</b>
7.1 Contrats nationaux . . . . .	30
7.2 Contrats internationaux . . . . .	30
<b>8 Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>30</b>
8.1 Actions régionales . . . . .	30
8.2 Actions nationales . . . . .	31
8.3 Actions européennes . . . . .	31
8.3.1 Europe de l'ouest . . . . .	31
8.3.2 Europe de l'est . . . . .	32
8.4 Actions internationales . . . . .	32
8.4.1 Afrique . . . . .	32
8.4.2 Amérique du Nord . . . . .	32
8.4.3 Chine . . . . .	33
8.5 Visites, et invitations de chercheurs . . . . .	34
<b>9 Diffusion de résultats</b>	<b>34</b>
9.1 Animation de la Communauté scientifique . . . . .	34
9.2 Enseignement . . . . .	34
9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	34
<b>10 Bibliographie</b>	<b>35</b>

*Le projet IDOPT est un projet commun au CNRS (département SPM), à l'université Joseph Fourier (Grenoble 1), à l'INPG et à l'INRIA Rhône-Alpes. Ce projet est localisé au laboratoire LMC de l'IMAG.*

## 1 Composition de l'équipe

**Note :** Certains chercheurs ou enseignants-chercheurs (Anestis Antoniadis, Isabelle Charpentier, Patrick Witomski, Jérôme Monnier, Dinh Tuan Pham) n'effectuent qu'une partie de leur recherche au sein du projet IDOPT.

### Responsable scientifique

François-Xavier Le Dimet [DR INRIA, délégation de l'université Grenoble 1]

### Assistante de projet

Corinne Bayeuil [CES, puis vacation]

### Personnel INRIA

Laurent Debreu [CR]

Eugene Kasantzev [CR]

Christophe Vouland [Ingénieur - Associé]

### Personnel CNRS

Isabelle Charpentier [CR]

Dinh Tuan Pham [DR]

Pierre Saramito [CR]

### Personnel institut national polytechnique de Grenoble

Jérôme Monnier [MC]

### Personnel université de Grenoble 1

Anestis Antoniadis [professeur]

Eric Blayo [MC]

Patrick Witomski [professeur]

### Personnel université de Nice

Jacques Blum [professeur]

### Chercheurs post-doctorants

Veronika Fedorenko [post-doc SHOM]

Junqing Yang [post-doc ANFAS]

### Chercheurs doctorants

Didier Auroux [allocataire moniteur]

Sophie Durbiano [PRAG INPG]

Jocelyn Etienne [allocataire MESR]

Blaise Faugeras [allocataire MESR]

Sophie Fontaine [boursière ADEME-ASCOPARG]

Ibrahim Hoteit [allocataire MESR]

Vincent Janicot [contrat CIFRE avec la société ANACAD]

Claire Lauvernet [Bourse CNS-INRA]

Wu Lin [boursier Ambassade de France - Chine]

Cyril Mazaure [stagiaire, puis boursier ANFAS]

Véronique Martin [Doctorant Paris 13]  
Pierre Ngnepieba [boursier CIES]  
Ioana Paun [ATER puis postdoc à l'Université de Strasbourg]  
Denis Quelo [Doctorant ENPC]  
Patrick Vidard [boursier CERFACS]

#### **Chercheurs invités**

Marina Kleptsyna [Chercheur, Institut des Problèmes de Transmission de l'Information, Russian Academy of Sciences]  
Patrick Marchesiello [Chercheur, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California at Los Angeles]  
MUMU [Professeur, Académie de Sciences de Chine]  
Victor Shutyaev [Directeur de recherche, Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences]

#### **Collaborateurs extérieurs**

Gérard Grégoire [professeur, université de Grenoble 2]  
Jacques Verron [DR CNRS au LEGI]  
Alain Le Breton [professeur, université de Grenoble 1]

#### **Stagiaires**

Krzysztof Bosak [stagiaire polonais, université de Wrocław]  
Ahmed Kaffel [stagiaire tunisien]  
Jean-Guillaume Piccinali [stagiaire météo-france]

## **2 Présentation et objectifs généraux**

De nombreux domaines de la physique et de la mécanique sont modélisés par des systèmes à paramètres répartis, régis par des équations aux dérivées partielles, qui décrivent le comportement spatio-temporel des variables du modèle. Deux types de problèmes se posent alors naturellement et leur étude fait l'objet de ce projet :

**i) l'identification :** Certains paramètres ou certaines fonctions intervenant dans ces modèles sont inconnus, ou plutôt mal connus (coefficients de diffusion dans des équations paraboliques, sources non linéaires dans des équations elliptiques, conditions initiales ou conditions aux limites, etc). On se propose d'identifier ces paramètres ou fonctions à partir d'observations expérimentales : ce sont des problèmes inverses (par opposition à la résolution des équations elles-mêmes qui constitue le problème direct). La résolution de ces problèmes est une aide précieuse pour le physicien qui, en général, possède un modèle de son système, mais avec une grande incertitude sur ses paramètres. La résolution du problème inverse lui fournit donc une information primordiale.

**ii) l'optimisation :** Les dispositifs expérimentaux sont pilotés par un physicien qui dispose en général d'un certain nombre de fonctions de contrôle qui lui permettent d'optimiser et éventuellement de stabiliser le système. Le travail du mathématicien consiste à déterminer

de façon optimale ces fonctions, que ce soit sous forme d'une commande en boucle ouverte (pré-programmation) ou en boucle fermée (*feedback* stabilisant).

### 3 Fondements scientifiques

#### 3.1 Commande optimale et optimisation de forme

**Participants :** Jacques Blum, Jérôme Monnier, François-Xavier Le Dimet, Patrick Witomski.

**Commande optimale** Le lien entre les problèmes d'identification et ceux d'optimisation réside dans le fait qu'il s'agit, dans les deux cas, de minimiser une fonctionnelle dépendant de la solution d'une équation aux dérivées partielles (EDP). En effet, les problèmes d'identification peuvent être formulés comme la minimisation de l'écart quadratique entre les observations expérimentales et les quantités correspondantes calculées par résolution du système d'équations, les variables de contrôle sont, dans ce cas, les paramètres ou les fonctions à identifier. La minimisation de fonctionnelles dépendant de la solution d'une EDP, par rapport à un vecteur de contrôle intervenant soit dans les conditions initiales, soit dans les conditions aux limites ou dans l'équation elle-même, relève de la théorie du contrôle optimal des EDP [Lio68].

**Optimisation de forme** Un problème d'optimisation de forme ou encore un problème de contrôle par la forme, est un problème de contrôle optimal dont la variable de contrôle est la forme du domaine dans lequel les équations sont posées. Une théorie mathématique de contrôle par la forme a été développée dans les années 70 (l'école française joue alors un rôle prépondérant : [MS76,Céa81], ...). Depuis, beaucoup de mathématiciens, numériciens et mécaniciens travaillent sur ces problèmes. De même, les problèmes industriels d'optimisation de forme sont de plus en plus nombreux. Voici quelques exemples d'objets dont les ingénieurs cherchent encore à optimiser la forme : une tuyère, une filière en cristallogénèse, une aile d'avion, un guide d'ondes, un pilier ... L'optimisation de forme peut également être un bon outil pour calculer la forme de la surface d'un fluide connaissant les actions extérieures qui lui sont exercées. Par exemple, la forme d'une goutte métallique soumise à un champ électrique (ou en suspension dans un champ électromagnétique) peut être calculée en minimisant l'énergie de la goutte par rapport à sa forme.

Du point de vue méthodologie mathématique, on définit l'espace des domaines  $\mathcal{D}$  comme étant l'ensemble des domaines homéomorphes à un domaine de référence  $\hat{\Omega}$  (on a :  $\mathcal{D} = \{\Omega, \Omega = T(\hat{\Omega}); T \text{ homéomorphisme}\}$ ). On définit ensuite la dérivée d'une fonction par rapport au

- 
- [Lio68] J. LIONS, *Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles*, Dunod, 1968.
- [MS76] F. MURAT, J. SIMON, *Sur le contrôle par un domaine géométrique*, Publication du L.A. 189, Université P. et M. Curie Paris VI, 1976.
- [Céa81] J. CÉA, « Problems of shape optimal design », in : *Optimization of distributed parameter structures*, E. Haug et J. Cea (éditeurs), II, Sijthoff and Noordhoff, Alphen aan den Rijn, The Netherlands, 1981.

domaine ainsi <sup>[MS76]</sup> : a) on transporte la fonction sur le domaine de référence, b) on dérive la fonction transportée par rapport à la transformation  $T$ . Grâce à ces définitions, un problème de contrôle par la forme se ramène à un problème de contrôle optimal "classique" dans le cadre d'espaces de Banach. Du point de vue numérique, un schéma classique de résolution de ce type de problème est le suivant. On minimise la fonction coût par une méthode de descente (un algorithme de type gradient, quasi-Newton). On calcule le gradient en introduisant une équation d'état adjoint. Si la forme du domaine est décrite à l'aide de splines cubiques, les variables de contrôle sont les points splines. Une difficulté classique est la minimisation même de la fonctionnelle coût. En effet, cette fonctionnelle est généralement non convexe et les variables de contrôle ainsi que les variables d'état sont soumises à des contraintes non linéaires. Par conséquent, l'algorithme converge souvent vers un minimum local qui dépend de la forme initiale, ou peut même ne pas converger...

### 3.2 Dérivation automatique d'un code adjoint

**Participante** : Isabelle Charpentier.

Les techniques d'assimilation de données fondées sur le contrôle optimal utilisent l'adjoint du modèle pour calculer le gradient de l'écart entre les solutions du modèle et les observations. Ce gradient permet de mettre en œuvre des algorithmes d'optimisation menant à l'estimation de l'état optimal par rapport aux observations. Écrire un code adjoint est un projet réalisable soit en composant à la main les instructions adjointes une à une, soit en générant ce code grâce à un outil de différentiation automatique <sup>[CG00]</sup> <sup>[Cha98]</sup>. Ceux qui ont pratiqué l'écriture manuelle de codes adjoints connaissent parfaitement les méthodes à appliquer, mais savent également que cette tâche, fastidieuse et rébarbative, est source d'importantes erreurs. L'alternative offerte par les outils de différentiation est appréciable mais souvent mésestimée par les constructeurs/utilisateurs de code adjoints. Il a semblé intéressant à I. Charpentier de contribuer à un meilleur dialogue entre concepteurs d'outils de différentiation automatique et utilisateurs de codes adjoints <sup>[CF98]</sup>. Cette raison a motivé sa participation à l'action de recherche coopérative "Mode Inverse Opérationnel". Ce travail se poursuit dans le cadre de l'action de recherche coopérative "COuplage MOdèles et Données en Environnement".

### 3.3 Etude de sensibilité et méthode au second ordre

**Participant** : François-Xavier Le Dimet.

Un modèle physique pour lequel une partie de l'information est manquante (coefficients, conditions initiales ou aux limites à identifier) peut être fermé par un principe variationnel

- 
- [MS76] F. MURAT, J. SIMON, *Sur le contrôle par un domaine géométrique*, Publication du L.A. 189, Université P. et M. Curie Paris VI, 1976.
- [CG00] I. CHARPENTIER, M. GHEMIRE, « Efficient adjoint derivatives: Application to the atmospheric model MESO-NH », *Optimization Methods and Software* 13, 1, 2000, p. 35–63.
- [Cha98] I. CHARPENTIER, « The MesODiF package for gradients computations with the atmospheric model Meso-NH », in: *Environmental modeling and software*, APMS98, Paris, 1998. À paraître.
- [CF98] I. CHARPENTIER, C. FAURE, « Automatic differentiation for adjoint code generation », *rapport de recherche n° 3555*, INRIA, Novembre 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3555.html>.

minimisant, par exemple, un écart aux observations. Le problème est alors posé en utilisant la méthodologie du contrôle optimal et la solution est obtenue par résolution du système d'optimalité. De nombreuses applications en physique requièrent des études de sensibilité, qui ne sont rien d'autre que l'estimation du gradient d'une fonction réponse par rapport aux paramètres. On est donc amené, pour le calcul de sensibilité, à dériver le système d'optimalité et donc à tenir compte des propriétés au second ordre. De façon générale, on a introduit un adjoint du second ordre qui permet de résoudre ce problème. De plus ce système permet d'avoir accès à des propriétés du second ordre : spectre du hessien, produit hessien-vecteur avec des applications pour des algorithmes numériques performants de type Newton, etc. [LNLV97, Le 97a, Le 97b, Le 97c]. Ces travaux font l'objet d'une collaboration avec Florida State University pour la météorologie [LND02]. Une application de cette technique a été réalisée avec le modèle d'écoulement en zone non-saturée pour les études de propagation d'erreurs [NLBN01, LNS01].

### 3.4 Méthode de décomposition en sous-domaines

**Participante** : Isabelle Charpentier.

La simulation de phénomènes physiques complexes tels que rencontrés en mécanique des fluides, calcul des structures, ..., nécessite souvent la résolution de problèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) discrétisés dans des espaces de dimension importante. Les discrétisations employées conduisent alors à la résolution de systèmes linéaires creux de grande taille et souvent sans structure particulière ce qui prohibe l'usage efficace des solveurs (parallèles) traditionnels.

Les méthodes de décomposition de domaine (MDD) offrent une alternative algorithmique très intéressante pour la résolution de problèmes d'EDP. De manière simplifiée, ces méthodes procèdent ainsi : le domaine est décomposé en sous-domaines se recouvrant ou non, et les problèmes d'EDP posés sur les sous-domaines sont couplés par les conditions aux limites imposées aux frontières nouvellement créées.

L'emploi de méthodes de décomposition de domaine est désormais classique, lorsque la géométrie du domaine de calcul est complexe ou que les équations du problèmes impliquent une

- 
- [LNLV97] F.-X. LE DIMET, H.-E. NGODOCK, B. LUONG, J. VERRON, « Sensitivity Analysis in Variational Data Assimilation », *J. of the Meteo. Soc. of Japan* 75, 1B, 1997, p. 245–255.
- [Le 97a] F.-X. LE DIMET, « Automatic Differentiation in Data Assimilation », *in: Proceedings of IMACS Conference*, Maui, USA, 1997.
- [Le 97b] F.-X. LE DIMET, « Second Order Information in Variational Data Assimilation », *in: Proceedings of The Third Conference on adjoint Application in Meteorology and Oceanography*, Lennoxville, Canada, 1997.
- [Le 97c] F.-X. LE DIMET, « Sensitivity Analysis in the presence of data », *in: Proceedings of meeting of the Lyapunov Institute*, Nancy, 1997.
- [LND02] F.-X. LE DIMET, I. NAVON, D. DAESCU, « Second order information in data assimilation », *Mon. Wea. Rev.* 130, 3, 2002, p. 629–648, À paraître.
- [NLBN01] P. NGNEPIEBA, F.-X. LE DIMET, A. BOUNKONG, G. NGUETSENG, « Identification de paramètres: Une application à l'équation de Richards », *CPRSR (revue Hermès)*, 2001, À paraître.
- [LNS01] F.-X. LE DIMET, P. NGNEPIEBA, V. SHUTAYEV, « On error analysis in data assimilation », *Russian J. Anal. Math. Modelling* 17, 2001, À paraître.

singularité dans la solution. Ces méthodes sont également essentielles pour résoudre conjointement des modèles aux équations différentes, par exemple pour les couplages océan/atmosphère ou fluide/structure. Quelle que soit l'application, il en résulte une décomposition des calculs qui invite à l'utilisation de calculateurs parallèles.

### 3.4.1 Synthèse modale

Parfois employées pour décrire et comprendre des phénomènes physiques complexes, les solutions propres d'un système d'équations aux dérivées partielles forment un espace vectoriel, que l'on souhaite de dimension petite au regard des autres discrétisations possibles. Suivant la nature du problème physique, cet espace est utilisable pour des calculs de vibrations de pièces mécaniques, des calculs de stabilité de structures sous certaines excitations, des problèmes de décroissance asymptotique de phénomènes physiques au cours du temps.

Les méthodes de synthèse modale (ou "sous-structuration dynamique") sont des méthodes de décomposition de domaine mises au point pour approcher les solutions propres d'opérateurs aux dérivées partielles elliptiques. L'espace d'approximation est constitué de modes propres du même opérateur calculés sur chaque sous-domaine de la décomposition, et de modes d'interface lorsque nécessaire.

Une méthode de synthèse modale utilise une méthode de décomposition du domaine en sous-domaines avec recouvrement [CDM96]. Les atouts de cette méthode sont un taux de convergence infini, l'obtention théorique des valeurs propres à la précision désirée, et une mise en œuvre simple. L'absence d'interface conduit à la construction d'un espace vectoriel ne contenant que des modes propres locaux calculés de manière identique et étendus par 0 à tout le domaine. Ensuite, le schéma algorithmique approche les solutions du problème spectral global par la meilleure combinaison linéaire de modes de cette base.

### 3.4.2 Programmation parallèle

Bien que naturelle, une programmation parallèle des méthodes de décomposition de domaine se doit aussi d'être efficace. Étant donné un bon algorithme numérique, une mise en œuvre parallèle doit assurer que chaque processeur est toujours actif pour du travail utile durant l'exécution. Cet objectif implique que le surcoût de communication entre processeurs soit masqué par du calcul utile, et qu'il existe un ordonnancement des tâches de calcul sur les processeurs qui les rende actifs presque tout le temps. Les algorithmes parallèles employés habituellement pour mettre en œuvre les méthodes de décomposition de domaine sont statiques en terme de distribution des tâches de calcul. En d'autres mots, les calculs sur les sous-domaines sont distribués une seule fois en début de simulation. Ce choix est contraignant. Lorsque des techniques d'adaptation [Ver97] de l'espace de discrétisation sont employées pour obtenir des solutions numériques précises, le raffinement du maillage de l'un ou l'autre sous-domaine induit immédiatement un déséquilibre des coûts de calcul (sur cet aspect, voir également §6.3).

---

[CDM96] I. CHARPENTIER, F. DE VUYST, Y. MADAY, « Méthode de synthèse modale avec une décomposition de domaine par recouvrement », *C. R. Acad. Sci. Paris, Série I 322*, 1996, p. 881–888.

[Ver97] R. VERFÜRTH, *A Review of a Posteriori Error Estimates and Adaptive Mesh-Refinement Techniques*, Wiley-Teubner, 1997.

### 3.5 Problèmes inverses, ondelettes et méthodes non-paramétriques

**Participants :** Anestis Antoniadis, Gérard Grégoire, Zouhir Hamrouni, Dinh Tuan Pham.

Dans un ensemble de travaux maintenant publiés [AFR98,Ant99,AP98], nous avons développé des méthodes d'identification de signaux noyés dans du bruit aléatoire par des méthodes de sélection de modèles et de régression non paramétrique fondées sur les notions d'analyse multirésolution et de décomposition en ondelettes. Ces travaux ont introduit de nouveaux types d'estimateurs pour des classes de fonctions "hétérogènes" (espaces de Besov) et ont également permis de comprendre plus profondément le mécanisme d'autres méthodes d'identification plus classiques. La plupart des résultats théoriques obtenus sont de nature asymptotique dans le sens où le nombre d'observations dont on dispose tend vers l'infini. Comme tout résultat asymptotique, il y a certains doutes sur le bien-fondé des propriétés asymptotiques lorsque l'on ne dispose que d'un nombre fini et limité d'observations. La limite du nombre d'observations nécessaire pour obtenir des résultats proches des résultats asymptotiques est une question importante que nous avons abordée. Les méthodes de débruitage à l'aide d'ondelettes reposent sur un échantillonnage uniforme (équidistant) du signal observé. Afin de pouvoir étendre les résultats pour des échantillonnages presque arbitraires, nous avons utilisé une méthode hybride consistant à interpoler les données dans un espace de Sobolev sous contrainte de norme minimale et à débruiter ensuite le signal interpolé par des méthodes de pénalisation de ses coefficients d'ondelettes [15]. Les problèmes d'optimisation non-convexe ainsi posés sont résolus par des méthodes d'optimisation stochastique ou par des réseaux d'ondelettes interpolatrices [32]. Les techniques de débruitage ainsi développées trouvent tout naturellement leur application dans le cadre des problèmes inverses.

Enfin, pour étudier le problème d'estimation des ruptures sur l'intensité d'un processus ponctuel, nous avons analysé les différences des coefficients d'ondelettes du processus. La méthode développée nous a permis d'identifier la localisation et l'amplitude de ces ruptures dans un cadre de données dépendantes [AGM99] et ceci de manière asymptotiquement efficace. Pour estimer plus généralement la fonction d'intensité d'un processus ponctuel, G. Grégoire, en collaboration avec J. Nembé de l'université de Libreville au Gabon, a proposé une méthode basée sur le principe de longueur de description minimal [GN00,GN99]. Dans le prolongement de ce travail, G. Grégoire étudie les problèmes de calcul de l'estimateur dans un cadre non asymptotique. Dans le contexte d'observations de données censurées, G. Grégoire s'intéresse

- 
- [AFR98] A. ANTONIADIS, J. FERRER, M. ROTH, « Data Compression for Diffraction Patterns », *Acta. Cryst. Series D*, 54, 1998, p. 184–199.
  - [Ant99] A. ANTONIADIS, « Wavelets in Statistics: A Review », *Journal of the Italian Statistical Society* 6, 2, 1999, p. 97–144.
  - [AP98] A. ANTONIADIS, D. PHAM, « Wavelet regression for random or irregular design », *Computational Statistics and data analysis* 28, 4, 1998, p. 333–369, 353–352.
  - [AGM99] A. ANTONIADIS, I. GIJBELS, B. MACGIBBON, « Nonparametric estimation for the location of a change-point in an otherwise smooth hazard function », *Scand. J. Statist.*, 1999, à paraître.
  - [GN00] G. GRÉGOIRE, J. NEMBÉ, « Convergence rates for the minimum complexity estimator of counting process intensities », *Journal of Nonparametric Statistics*, 12, 2000, p. 611–643, à paraître.
  - [GN99] G. GRÉGOIRE, J. NEMBÉ, « Inference for a counting process by minimum complexity », soumis, 1999.

à l'inférence statistique relative aux fonctions quantiles de régression lorsqu'une covariable est présente. Par ailleurs, pour étudier le problème d'une fonction discontinue dont les observations sont bruitées, G. Grégoire et Z. Hamrouni, dans le cadre de la thèse de ce dernier, ont utilisé la méthode de régression linéaire locale. La motivation pour le recours à cette méthode non-paramétrique repose sur sa propriété d'absence d'effets de bord. Après avoir étudié les problèmes d'estimation, ils se sont intéressés aux problèmes de tests, à l'estimation du nombre de ruptures et à la qualité de reconstitution du signal.

### 3.6 Filtrage de Kalman

**Participants :** Jacques Blum, Alain Le Breton, Dinh Tuan Pham, Jacques Verron, Ibrahim Hoteit.

Le filtrage est l'outil de base dans l'approche séquentielle pour le problème de l'assimilation de données dans les modèles numériques, plus particulièrement en météorologie et en océanographie. Cette approche, de type stochastique, se justifie par le fait que la dynamique du système étudié est chaotique et ressemble donc à un système aléatoire. De plus, l'état initial, étant inconnu, peut être commodément modélisé par un vecteur aléatoire et on peut prendre en compte l'imperfection du modèle par l'introduction d'un terme de bruit aléatoire. Le but du filtrage est de déterminer une bonne approximation de l'espérance conditionnelle de l'état du système (ainsi que sa matrice de covariances d'erreur) au vu des données observées, ces dernières apparaissant comme les valeurs d'un processus lié à l'état du système et contaminées par un bruit d'observation. Pour les applications en météorologie et en océanographie, l'approche filtrage a rencontré deux difficultés majeures. La première est le caractère non linéaire des équations de la dynamique, qui a conduit à l'utilisation d'un filtre sous-optimal dit de Kalman étendu dans lequel on linéarise ces équations au voisinage de l'estimation courante de l'état. Cependant ce filtre peut être instable et parfois diverge complètement. La deuxième difficulté est la très grande dimension de l'état du système. L'application du filtre conduirait à des calculs prohibitifs. De plus, cette grande taille pose le problème de la spécification adéquate des statistiques des erreurs.

Notre objectif dans le cadre de ce projet consiste à mener une étude approfondie des possibilités de l'approche par filtrage et à terme d'appliquer la méthode sur des données réelles. À cette fin, nous avons proposé un filtre de type Kalman étendu basé sur l'utilisation d'une matrice de covariance des erreurs singulière et de rang faible. Ce filtre opère selon le principe de ne pas faire de corrections dans les directions d'atténuation naturelle des erreurs. Les corrections sont effectuées uniquement dans des directions appartenant à un sous-espace vectoriel. Celui-ci est construit au départ par la méthode des fonctions orthogonales empiriques (EOF), mais évolue par la suite selon le modèle. Ainsi, nous l'appelons (*Singular Evolutive Extended Kalman*) [PVR96,PVR98]. Il a été d'abord testé dans une configuration réduite basée sur le modèle océanique quasi-géostrophique, qui donne des résultats très satisfaisants [PVR96,PVR98]. Il

---

[PVR96] D. PHAM, J. VERRON, M. ROUBAUD, « A singular evolutive extended Kalman filter for data assimilation in oceanography », *rapport de recherche n° RT 162*, LMC/IMAG, 1996.

[PVR98] D. PHAM, J. VERRON, M. C. ROUBAUD, « A Singular Evolutive Extended Kalman Filter for Data Assimilation in Oceanography », *Journal of Marine Systems* 16, 3 & 4, 1998, p. 323–340.

est ensuite expérimenté avec succès pour l'assimilation des données altimétriques dans un cadre réaliste d'un modèle aux équations primitives pour l'océan Pacifique tropical [VGP<sup>+</sup>97,PVG98]. Nous travaillons actuellement à l'amélioration du filtre, d'une part pour renforcer sa robustesse vis-à-vis de la non-linéarité [Pha98] et d'autre part, pour réduire encore son coût de calcul sans dégradation notable de sa performance.

Sur le premier point, l'idée est d'abandonner la linéarisation dans le filtre de Kalman étendu au profit de l'interpolation et des tirages Monte-Carlo. Ainsi nous avons construit un autre filtre baptisé SEIK (*Singular Evolutive Interpolated Kalman*)<sup>[Pha96,Pha97,PVG98]</sup>, qui semble être plus robuste vis-à-vis de la non-linéarité avec l'avantage d'être plus simple à réaliser. D'autre part, nous avons exploré des techniques de filtrages stochastiques avancées pour pallier les difficultés liées aux fortes non-linéarités du système [Pha98]. Ces résultats sont décrits dans la partie "Techniques de filtrage stochastique" de la section "Résultats nouveaux/Assimilation de données en océanographie" (voir les détails dans cette section et les références aux publications correspondantes).

En incidence des activités centrées sur les méthodes stochastiques pour l'assimilation de données, des travaux de nature plus théorique se développent dans le domaine du filtrage et de l'identification pour des systèmes stochastiques avec bruits colorés [BR00] ou de type fractionnaire [KLR00a,KLR00b,KLR99]. Ces derniers notamment semblent offrir des perspectives intéressantes pour la modélisation dans la mesure où ils permettent de prendre en compte d'éventuels phénomènes de dépendance à longue portée dans les dynamiques.

- 
- [VGP<sup>+</sup>97] J. VERRON, L. GOURDEAU, D. PHAM, R. MURTUGUDDE, J. BUSALACCHI, « Une nouvelle implémentation du filtrage de Kalman appliqué à l'assimilation de données altimétriques dans un modèle de l'océan Pacifique tropical. », *Aviso News letter* 5, 1997.
- [PVG98] D. PHAM, J. VERRON, L. GOURDEAU, « Filtres de Kalman singuliers évolutifs pour l'assimilation de données en océanographie », *C. R. Acad. Sci. Paris, Science de la terre et des planètes* 326, 1998, p. 255–260.
- [Pha98] D. PHAM, « Stochastic Methods for Sequential Data Assimilation in Strongly Nonlinear Systems », *rapport de recherche n°3597*, INRIA, décembre 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3597.html>.
- [Pha96] D. PHAM, « A singular evolutive interpolated Kalman filter for data assimilation in oceanography », *rapport de recherche n° RT 163*, LMC/IMAG, 1996.
- [Pha97] D. PHAM, « Dimension, Predictability and Reduced Rank Kalman Filtering in Data Assimilation », *in: Proceedings of the third bilateral French-Russian conference: Predictability of Atmospheric and Oceanic Circulations*, 1997.
- [BR00] A. L. BRETON, M. ROUBAUD, « Asymptotic optimality of approximate filters in stochastic systems with coloured noises », *SIAM Journal of Control and Optimization* 39, 3, 2000, p. 917–927.
- [KLR00a] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON, M.-C. ROUBAUD, « General approach to filtering with fractional Brownian noises - Application to linear systems », *Stochastics and Stochastics Reports* 71, 2000, p. 119–140.
- [KLR00b] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON, M.-C. ROUBAUD, « Parameter estimation and optimal filtering for fractional type stochastic systems », *Statistical Inference for Stochastic Processes* 3, 1-2, 2000, p. 173–182.
- [KLR99] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON, M.-C. ROUBAUD, « An elementary approach to filtering in systems with fractional Brownian observation noise », *in: Probability Theory and Mathematical Statistics, Proceedings of the 7th Vilnius Conference*, B. G. et al. (éditeur), VSP/TEV, p. 373–392, 1999.

## 4 Domaines d'applications

### 4.1 Identification et optimisation en physique

**Mots clés :** capillarité, commande optimale, cristallogenèse, électromagnétisme, frontière libre, fusion nucléaire, optimisation de forme, plasma, problème inverse.

**Résumé :** *Les domaines applicatifs sont la physique des plasmas (pour la fusion nucléaire), la cristallogenèse (procédé Bridgman de fabrication de cristaux) et la capillarité. Dans chacun de ces thèmes, une optimisation est faite, que ce soit pour identifier une quantité physique non connue, pour minimiser une énergie ou pour optimiser une forme ou une frontière libre.*

#### 4.1.1 Physique des plasmas

**Participants :** Jacques Blum, Krzysztof Bosak, Isabelle Charpentier, Ioana Paun.

**Problèmes d'identification en physique des plasmas.** Ce problème est motivé par l'interprétation des mesures expérimentales dans le plasma (gaz ionisé) d'un Tokamak (dispositif expérimental visant à confiner le plasma dans un champ magnétique).

Il s'agit d'identifier la densité de courant du plasma à partir d'informations surabondantes comme :

- la mesure expérimentale du flux magnétique poloidal et de sa dérivée normale sur le bord du domaine (conditions de Cauchy),
- la connaissance des intégrales sur un certain nombre de cordes verticales de la composante verticale du champ magnétique.

De nombreux problèmes ouverts demeurent, comme le problème mathématique de l'identifiabilité des sources non-linéaires à partir des mesures. Nous nous sommes tout d'abord intéressés au cas cylindrique où l'équation de Grad-Shafranov devient  $-\Delta\Psi = f(\Psi)$ , l'identifiabilité de  $f$  à partir de conditions de Cauchy est un problème ouvert dans le cas général. Des études mathématiques et numériques ont été effectuées pour améliorer la compréhension de ce problème. Le problème est formulé par la minimisation de l'écart quadratique entre les mesures expérimentales et les grandeurs calculées. Une régularisation de Tikhonov est utilisée pour rendre le problème stable. La source  $f$  est identifiée par décomposition dans une base de  $B$ -splines cubiques. Un algorithme de choix automatique du paramètre de régularisation est développé, à l'aide des techniques de validation croisée, qui s'avèrent cependant assez coûteuses dans la pratique. À l'aide d'un changement de base par rapport à une norme dérivée de la norme  $H^2$ , l'identification peut être réalisée de façon satisfaisante dans une base d'ondelettes à support compact de I. Daubechies, sans terme de régularisation dans la fonctionnelle à minimiser <sup>[BB97]</sup>.

---

[BB97] J. BLUM, H. BUVAT, « An inverse problem in plasma physics: the identification of the Current Density Profile in a Tokamak », in: *Large-Scale Optimization with Applications, Part 1: Optimization in Inverse Problems and Design, IMA Volume in mathematics and its applications 92*, Springer, 1997, p. 17-36.

Dans le cadre d'un nouveau contrat avec le CEA, nous procédons à la mise au point d'une version « temps-réel » de l'algorithme d'identification.

### **Modélisation d'un jet magnétohydrodynamique en configuration axisymétrique.**

**Applications au vent stellaire.** On considère le problème de modélisation d'un jet de plasma, applicable à la fois aux objets stellaires et aux objets extra-galactiques. L'objet d'une partie de la thèse d'I. Paun [11], co-encadrée par J. Blum et B. Michaux, est d'étudier la configuration magnétique, supposée axisymétrique, qui correspond à l'éjection du plasma à partir d'un disque de matière.

La modélisation mathématique est dérivée des équations de la magnétohydrodynamique. Elle correspond au couplage entre une équation aux dérivées partielles 2D de type Grad-Shafranov généralisée pour le flux poloïdal, décrivant la collimation de l'écoulement, et l'équation de Bernoulli généralisée, décrivant la conservation de l'énergie de l'écoulement.

La nature mathématique de ce couplage d'équations est complexe, du fait du changement de type de l'équation de Grad-Shafranov (elliptique-hyperbolique) et de la dégénérescence de l'opérateur du second ordre au voisinage de la surface d'Alfvén et des surfaces magnéto-soniques rapide et lente.

Par ailleurs, l'étude des conditions aux limites rendant le problème bien posé est encore un problème ouvert à l'heure actuelle.

Le travail est mené en collaboration avec l'équipe de Guy Pelletier, du laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble, qui travaille depuis plusieurs années sur la modélisation physique des jets MHD.

Ioana Paun a calculé les solutions auto-similaires de ce problème [11].

#### **4.1.2 Capillarité et hydrodynamique du mouillage**

**Participants :** Jérôme Monnier, Patrick Witomski.

Dans la thématique capillarité et hydrodynamique du mouillage, J. Monnier et P. Witomski travaillent sur la modélisation et la simulation numérique du mouillage d'un solide par un liquide. Les applications industrielles sont nombreuses et variées : mouillage de solides par des liquides, optiques à focale variable par électro-mouillage, tirage de films photographiques, soudure en métallurgie... Mais nous nous intéressons pour le moment à la compréhension et à l'élaboration de méthodes numériques de simulation. A partir des travaux de Y. D. Shikmurzaev ([Shi93], [Shi94]) prenant en compte les effets Marangoni dus à la variation de tension de surface, nous avons écrit un nouveau modèle couplant surface libre, tension superficielle (modèle "micro") et mouvement du fluide (modèle "macro"). Nous avons développé l'analyse mathématique de ce modèle et mis au point un algorithme de résolution par éléments finis. Les résultats numériques ont été obtenus sur un cas test bien connu du plongement d'une plaque dans un liquide et on a pu visualiser l'évolution de l'angle de contact dynamique. Deux articles

---

[Shi93] Y. D. SHIKMURZAEV, « The moving contact line problem on a smooth solid surface », *Int. J. Multiphase Flow* 19, 4, 1993, p. 589–610.

[Shi94] Y. D. SHIKMURZAEV, « Mathematical modelling of wetting hydrodynamics », *Fluid Dynamics Research* 13, 1994, p. 45–64.

sont en fin de rédaction. Un objectif à terme est de reprendre le traitement numérique de l'électro-mouillage avec changement de topologie. La difficulté majeure provient du fait que, comme dans l'étude précédente, on doit prendre en compte aussi bien des phénomènes microscopiques (forces inter-moléculaires dues au champ électrique) que des phénomènes macroscopiques (capillarité, gravitation). Au travers de ces applications nous regardons les problèmes d'approximation numérique de problèmes à deux échelles.

### 4.1.3 Cristallogénèse

**Participants :** Patrick Witomski, Jérôme Monnier.

Jérôme Monnier est en disponibilité depuis septembre 2000. Ce thème est en sommeil pour l'instant. Un article sur l'existence et l'unicité d'une solution pour l'équation à courbure principale dans des domaines non convexes est en cours d'écriture. Celui-ci complète la partie simulation numérique qui a été publiée dans *Journal of Crystal Growth* qui est la référence en la matière [DDW00] ; voir aussi [BDWN99].

## 4.2 Environnement

**Mots clés :** assimilation de données, calcul parallèle, commande optimale, décomposition de domaine, filtrage, hydrologie, maillage adaptatif, météorologie, océanographie, prédictibilité, prévision, problème inverse.

**Résumé :** *Depuis les années 60, la modélisation numérique est utilisée en météorologie en vue de la prévision. Avec les progrès de la physique des modèles et le développement du potentiel de calcul, les avancées réalisées ont été très importantes. Dans la chaîne de la prévision numérique, le problème de l'assimilation de données (c'est-à-dire comment intégrer les données d'observation dans les modèles) est devenu un point crucial tant du point de vue de la nécessité de mettre en œuvre des méthodes performantes que de celui du coût de calcul. Dans le domaine météorologique les méthodes variationnelles semblent devoir s'imposer pour le futur dans la plupart des centres importants : Météo-France, Centre Européen à Reading, NCEP à Washington. Dans les autres disciplines de la géophysique, la modélisation numérique a été jusqu'alors principalement utilisée en vue de la compréhension des phénomènes. Il y a maintenant une orientation plus forte vers la prévision, comme par exemple en océanographie où un projet opérationnel de prévision (Mercator) se met en place, supporté par de nouvelles observations satellitaires (Topex-Poseidon). Le problème d'assimilation de données se pose donc maintenant dans ces disciplines avec des spécificités nouvelles. Il est clair qu'il y a là source d'importantes études*

---

[DDW00] S. DESPRÉAUX, T. DUFFAR, P. WITOMSKI, « Die optimal shape design for crystal growth process », *Journal of crystal growth* 209, 2000, p. 983–993.

[BDWN99] F. BABIK, T. DUFFAR, P. WITOMSKI, J. NABOT, « Determination of the geometry of the die in shaped crystal growth processes by an optimal design method », *Izvestia Akad. Nauk, Physical series* 63, 9, 1999, p. 1699–1704.

*méthodologiques et algorithmiques en raison de la difficulté des problèmes rencontrés (non-linéarité et très grandes dimensions). Le problème sera abordé à la fois par des méthodes variationnelles et par des méthodes de filtrage, le but final étant de construire de nouvelles méthodes combinant les points forts de chacune de ces deux approches.*

#### 4.2.1 Océanographie

**Participants :** Didier Auroux, Eric Blayo, Jacques Blum, Sylvain Carme, Laurent Debreu, Sophie Durbiano, Blaise Faugeras, Ibrahim Hoteit, François-Xavier Le Dimet, Ioana Paun, Dinh Tuan Pham, Jacques Verron, Patrick Vidard.

L'étude des circulations océaniques est un domaine de recherche en plein développement depuis déjà quelques années, et ceci pour deux raisons principales. Tout d'abord, l'océan est, avec l'atmosphère, l'une des composantes principales de la machine climatique terrestre : l'étude du climat passe donc par l'étude des océans. Par ailleurs, on assiste actuellement à l'émergence de l'océanographie opérationnelle, c'est-à-dire une prévision en temps quasi-réel des circulations océaniques à échéance de quelques semaines, de façon similaire à la météorologie opérationnelle. Des besoins en ce sens apparaissent (pêche, navigation, défense, météorologie...), et les efforts de recherche-développement se fédèrent autour de grands programmes nationaux et internationaux (projets MERCATOR et GODAE).

Ces objectifs requièrent la mise au point de modèles numériques d'océan performants, ainsi que de méthodes d'assimilation de données permettant d'introduire dans les modèles l'information apportée par les mesures (et notamment les mesures par altimétrie satellitaire, technologie arrivée à maturité ces toutes dernières années). Ceci pose naturellement un certain nombre de difficultés mathématiques, numériques et algorithmiques, dont certaines sont spécifiques à ce type d'application. Les travaux du projet IDOPT dans ce cadre sont les suivants :

- *Maillage adaptatif et méthodes de zoom* : le problème de la résolution spatiale est un point crucial en modélisation des circulations océaniques. En effet, non seulement l'activité océanique de méso-échelle, c'est-à-dire aux échelles inférieures à 100-200 km, est importante, mais de plus ses interactions avec les mouvements à grande échelle sont fortes. Il est donc souvent nécessaire de résoudre explicitement cette turbulence de méso-échelle pour pouvoir espérer représenter correctement la circulation générale océanique. Par ailleurs, une fine résolution spatiale peut également être nécessaire pour mieux prendre en compte des effets locaux, ou encore pour réaliser des zooms à très haute résolution sur des régions présentant un intérêt particulier. Toutefois, les échelles spatiales et temporelles océaniques sont telles qu'une modélisation globale à très haute résolution est hors de portée des super-calculateurs actuels. Dans ce contexte, la mise au point de méthodes de maillage adaptatif et de méthodes de zoom présente un intérêt certain pour les océanographes. Nous avons travaillé sur ce thème en procédant à une analyse numérique du schéma de raffinement de maillage sur un cas simplifié <sup>[DB01]</sup>. Nous développons également un logiciel permettant d'apporter à tout modèle d'océan (et plus généralement à

---

[DB01] L. DEBREU, E. BLAYO, « Numerical Analysis of zoom methods for structured meshes », soumis, 2001.

tout modèle aux différences finies) la capacité d'adapter dynamiquement son maillage aux caractéristiques de l'écoulement, et également de réaliser des zooms sur des zones pré-définies (cf 5.1). Ceci est réalisé au niveau numérique par des schémas localement multigrilles, et au niveau informatique sans modifications du modèle lui-même, mais simplement par un ré-adressage de sa structure de données. L'utilisation de ce logiciel nous a permis d'effectuer des expériences dans plusieurs modèles réalistes d'océan : avec le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine dans le cadre d'une étude de la circulation dans le détroit de Gibraltar [55], avec le modèle OPA du LODYC (ParisVI) [BDB01] et en collaboration avec l'Université de Californie à Los Angeles [47].

- *Assimilation de données dans les modèles d'océan* : Le problème se pose pour l'océan dans les mêmes termes que pour l'atmosphère : on cherche à réaliser des simulations numériques en contraignant les solutions du modèle avec des observations afin de répondre à des objectifs de prévision en un sens déterministe ou probabiliste. Les deux approches classiques de ce problème sont le filtrage stochastique (filtre de Kalman) et l'assimilation variationnelle (contrôle optimal). Les difficultés principales rencontrées dans leurs applications en océanographie sont au nombre de trois :
  - la dimension des problèmes est telle (variable d'état de dimension  $10^6$  à  $10^7$  typiquement) qu'elle interdit l'utilisation directe des méthodes standards pour des problèmes réels (coût du modèle multiplié par plusieurs centaines).
  - les non-linéarités des équations sont fortes. L'optimalité de ces méthodes n'est donc plus garantie, et l'approximation du modèle linéaire tangent est même parfois problématique. L'application du filtre de Kalman étendu, qui est basé sur cette approximation, peut alors conduire à des instabilités voire une divergence. L'existence probable de multiples contrôles optimaux locaux pour l'assimilation variationnelle est une difficulté tout aussi importante.
  - les caractéristiques des erreurs (des observations et des modèles) sont souvent mal connues.

Dans ce cadre, nous travaillons à la mise au point de méthodes d'assimilation applicables en pratique, et prenant en compte ces spécificités. Les deux approches stochastiques et variationnelles sont étudiées, et font l'objet d'applications à des modèles variés, allant de configurations très idéalisées à des configurations réalistes. Ces travaux sont menés en collaboration avec l'équipe d'océanographie du Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels [LBV98,BLV98,BBV98], [Car99], [9], [8], [12].

- 
- [BDB01] E. BLAYO, L. DEBREU, B. BARNIER, « A general multiresolution approach to ocean modelling : experiments in a primitive equation model of the North Atlantic », soumis, 2001.
  - [LBV98] B. LUONG, J. BLUM, J. VERRON, « A variational method for the resolution of a data assimilation problem in oceanography », *Inverse Problems* 14, 1998, p. 979–997.
  - [BLV98] J. BLUM, B. LUONG, J. VERRON, « Variational assimilation of altimeter data into a non-linear ocean model: temporal strategies », in : *ESAIM Proceedings, Vol. 4, 21-57, Contrôle et Équations aux Dérivées Partielles*, Luminy, 1998, <http://www.emath.fr/proc/Vol.4/>.
  - [BBV98] E. BLAYO, J. BLUM, J. VERRON, « Assimilation variationnelle de données en océanographie et réduction de la dimension de l'espace de contrôle », in : *Equations aux Dérivées Partielles et Applications*, Gauthier-Villars, 1998, p. 199–219.
  - [Car99] S. CARME, *Méthode d'assimilation de données par Filtrage de Kalman dans un modèle réaliste de*

### 4.2.2 Météorologie

**Participants :** François-Xavier Le Dimet, Jiafeng Wang, Victor Shutayev, Mikhail Tsyroulnikov.

La prévision météorologique nécessite la reconstitution, aussi précise que possible, de l'état de l'atmosphère à un instant donné [LP99]. La prévision sera obtenue par intégration des équations à partir de cet instant initial. Les techniques variationnelles d'assimilation, fondées sur les techniques de contrôle optimal, sont maintenant très largement utilisées dans les modèles de circulation générale. Dans des modèles en aire limitée se pose le problème des conditions aux limites. On peut prendre comme variable de contrôle la condition aux limites, on est alors amené à résoudre un problème d'optimisation dans un espace de très grande dimension. En collaboration avec Florida State University (Xiaolei Zou), on teste sur le modèle MM5 des techniques destinées à réduire la dimension de l'espace de contrôle. Sur ce même modèle sont testées les estimations de sensibilité par rapport aux observations qui nécessitent une étude au second ordre.

### 4.2.3 Hydrologie

**Participants :** François-Xavier Le Dimet, Junqing Yang, Minghui Yu, Cyril Mazauric, Victor Shutayev, Pierre Ngnepieba.

Parmi les sciences de l'environnement, l'hydrologie connaît actuellement un important développement. Les problèmes liés au cycle de l'eau (pollution, crues) sont nombreux et font de plus en plus appel à la modélisation [Le 98]. L'étape ultime étant la prévision, le recours à l'assimilation de données est indispensable. Fondamentalement, les lois régissant les écoulements de surface ou souterrains sont les équations de la dynamique des fluides, des techniques de type contrôle optimal seront utilisées comme en météorologie et en océanographie. Des difficultés supplémentaires proviennent de l'influence de la topographie, de la nature des sols, de la végétation et à un autre niveau du manque de données [LSW00]. Deux problèmes sont considérés dans le projet : l'identification pour les écoulements souterrains et l'assimilation de données pour la sédimentation. Les modèles utilisés en hydrologie comportent des paramètres, tels que les coefficients de conductivité hydraulique, qui ne sont pas directement accessibles à la mesure. Les techniques d'identification de type contrôle optimal permettent une estimation de ces grandeurs à partir de ces observations [WVL00]. Dans le cadre d'IDOPT, le travail sur ce thème est réalisé avec Pierre Ngnepieba ; il s'effectue en collaboration avec le Laboratoire des Transferts Hydriques en Environnement (Grenoble) et dans le cadre du Programme National de Recherches en Hydrologie.

---

*l'Atlantique Nord*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, octobre 1999.

- [LP99] F.-X. LE DIMET, J. PAILLEUX, « Assimilation de données en météorologie », *in: Problèmes inverses, de l'expérimentation à la modélisation*, OFTA (ARAGO 22), 1999, p. 125–142.
- [Le 98] F.-X. LE DIMET, « Modélisation et ressources en eau », *in: Actes de CARI*, Dakar, 1998.
- [LSW00] F.-X. LE DIMET, V. SHUTAYEV, J. WANG, « The problem of data assimilation for soil water movement », *rapport de recherche*, decembre 2000.
- [WVL00] L. WHITE, B. VIEUX, F.-X. LE DIMET, « Estimation of optimal parameters for a surface hydrology model », *rapport de recherche*, University of Oklahoma, mai 2000.

L'assimilation de données pour des problèmes de sédimentation : les difficultés par rapport aux problèmes plus classiques de l'assimilation proviennent du fait que la géométrie du domaine change avec le temps d'où la nécessité de mettre en œuvre des techniques d'optimisation par rapport au domaine ; par ailleurs, outre les équations régissant l'écoulement fluide, une équation de concentration en sédiment doit être considérée, les temps caractéristiques des 2 phénomènes (écoulement et sédimentation) différant d'un ordre de grandeur. Ce travail est mené par Junqing Yang (doctorante) ; il s'effectue en collaboration avec l'Académie des Sciences de la R. P. de Chine (Institut de Physique de l'Atmosphère). Des travaux sur l'assimilation de données pour des modèles d'écoulement en surface sont menés en collaboration avec l'université d'Oklahoma, la finalité de ces travaux étant la prévision des crues ; il s'agit là d'un projet très important et ambitieux car il nécessite le couplage de modèles météo, hydrologique, de système d'information géographique et de données très hétérogènes (radar, satellites). La modélisation numérique des inondations fait partie du projet européen ANFAS (voir rubrique 7.2).

## 5 Logiciels

### 5.1 Maillage adaptatif

**Participants** : Eric Blayo, Laurent Debreu, Christophe Vouland.

Partant d'une première version d'un "package" de maillage adaptatif développé précédemment, nous procédons actuellement à la robustification et à l'ajout de potentialités au logiciel AGRIF (Adaptive Grid Refinement In Fortran), destiné aux modèles d'évolution aux différences finies. Il s'agit principalement du travail de Christophe Vouland, ingénieur-associé INRIA. Il est écrit en Fortran 90, et permet d'ajouter à un modèle des capacités d'adaptativité de son maillage. Le modèle proprement dit n'a quasiment pas à être modifié ; seul un fichier pré-défini de description du modèle doit être renseigné par l'utilisateur. Ce logiciel est d'ores et déjà utilisé dans plusieurs modèles océaniques (cf §6.3) en France et à l'étranger.

### 5.2 Identification en temps réel en physique des plasmas

**Participants** : Krzysztof Bosak, Jacques Blum, Isabelle Charpentier.

Le logiciel EQUINOX a été développé pour l'interprétation des mesures expérimentales dans le plasma (gaz ionisé) d'un Tokamak.

Il s'agit d'identifier en temps réel la densité de courant du plasma à partir d'informations surabondantes comme les mesures magnétiques, les mesures interférométriques et polarimétriques, l'effet Stark. Le logiciel est écrit en C++, la résolution de l'équation d'équilibre en éléments finis, les non-linéarités par des itérations de point fixe et l'écart aux mesures expérimentales par moindres carrés [54].

Le logiciel a été implémenté au JET (en Angleterre) et appliqué à des données réelles.

### 5.3 Décomposition de domaine

**Participants** : Isabelle Charpentier, A. S. Charão [projet Apache], B. Plateau [projet

Apache].

Une bibliothèque de programmes modulaires écrits en C++, dénommée Ahpik, a été construite pour permettre un codage rapide de nouvelles méthodes de décomposition de domaines avec raffinement de maillage. La mise en œuvre parallèle est réalisée par multi-programmation des processeurs.

## 6 Résultats nouveaux

### 6.1 Méthode de décomposition en sous-domaines

**Participant** : Isabelle Charpentier.

#### 6.1.1 Programmation parallèle

L'étude [mCP] d'une multi-programmation des tâches adaptée à la mise en œuvre des méthodes de décomposition de domaines, synchrones ou asynchrones, pour des problèmes impliquant une étape de raffinement de maillage, constitue le sujet de thèse proposé à A. S. Charão (projet Apache) par B. Plateau (projet Apache) et I. Charpentier. Cette étude a conduit à la construction d'une bibliothèque nommée Ahpik. De programmation modulaire en C++, Ahpik offre la possibilité de coder rapidement de nouvelles méthodes. L'outil a été présenté à la communauté mathématique lors d'une conférence sur les méthodes de décomposition de domaine [AmCP00].

#### 6.1.2 Chimie Atmosphérique

Cette thématique récente se développe dans le cadre de l'action de recherche incitative "COuplage MOdèles et Données en Environnement". Les objectifs sont, à terme, d'être capable de proposer des prévisions de pollution sur un modèle tridimensionnel en espace. Pour y parvenir, des techniques d'assimilation de données variationnelles seront appliquées lorsque le délicat problème [Cha00] de la construction de l'adjoint du modèle "3D+chimie" sera résolu.

Les premières études concernent des études de sensibilité [DSNA00] réalisées sur le modèle 0D de chimie, gérant les phases aqueuse et gazeuse, développé à l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Pour obtenir les sensibilités, nous avons utilisé les techniques de différentiation automatique (Odysée).

- 
- [mCP] A. CHARÃO, I. CHARPENTIER, B. PLATEAU, « Programmation par objet et utilisation de processus légers pour les méthodes de décomposition de domaine », À paraître.
- [AmCP00] A. B. ABDALLAH, A. CHARÃO, I. CHARPENTIER, B. PLATEAU, « Ozone estival : Méthodologie et résultats », *in: Thirteen international conference on domain decomposition methods (DD13)*, Lyon, 2000.
- [Cha00] I. CHARPENTIER, « Adjoining 3D atmospheric chemistry models », *in: ECMI*, Palerme, 2000.
- [DSNA00] R. DJOUAD, B. SPORTISSE, I. C. N. AUDIFFREN, « Modeling aqueous phase chemistry: numerical integration and sensitivity analysis », *in: GLOREAM*, Cottbus, 2000.

## 6.2 Problèmes inverses, ondelettes et méthodes non-paramétriques

**Participants :** Anestis Antoniadis, Gérard Grégoire, Zouhir Hamrouni.

Nous avons abordé le problème d'échantillonnage dans le cadre des analyses multi-résolutions permettant la réalisation d'algorithmes d'identification aussi rapides que la FFT. En effet, alors qu'en traitement du signal il est usuel de supposer que l'échantillonnage des signaux observés est à pas régulier, ceci est rarement le cas en régression où le plus souvent l'échantillonnage est aléatoire. Nous avons donc développé récemment [AP98,AGV97], [AF99] des méthodes d'estimation adaptées à l'échantillonnage aléatoire. Enfin nous avons établi les liens qui pouvaient exister entre algorithmes de régularisation pour des problèmes mal conditionnés [AL00], les méthodes de sélection de modèles [AGG97] et les techniques de lissage à l'aide d'ondelettes [15]. Ces derniers résultats ont fait l'objet de deux conférences invitées au congrès des sociétés statistiques américaines (JSM 2001) [31], [32].

Les méthodes d'identification par ondelettes reposent en général sur une distribution gaussienne des erreurs. Nous avons généralisé ces méthodes à des distributions d'erreurs de type exponentiel avec une variance qui peut être une fonction quadratique ou cubique de la moyenne dans [16], [AS01] ou encore de type Cauchy [ALP02]. Nous avons également utilisé la transformation continue en ondelettes pour détecter des discontinuités éventuellement présentes dans des signaux observés avec du bruit [Ant98], [AG02]. Ces méthodes ont été poursuivies pour estimer l'intensité de certains processus ponctuels intervenant lors de la modélisation de données de survie en médecine [AGM00]. Dans le cadre de notre collaboration avec l'Institut de Biologie Structurale du CEA nous avons développé des méthodes de compression d'images à l'aide de la transformation en ondelettes, transformation qui permet de mettre en œuvre des traitements non linéaires complexes avec des algorithmes rapides et simples. Les résultats de ce travail ont fait l'objet de la publication [AFR98]. Dans le cadre des problèmes inverses, nous avons

- 
- [AP98] A. ANTONIADIS, D. PHAM, « Wavelet regression for random or irregular design », *Computational Statistics and data analysis* 28, 4, 1998, p. 333–369, 353–352.
  - [AGV97] A. ANTONIADIS, G. GRÉGOIRE, P. VIAL, « Random design wavelet curve smoothing », *Statistics and Probability Letters* 35, 1997, p. 225–232.
  - [AF99] A. ANTONIADIS, J. FAN, « Regularization of Wavelets Approximations », *rapport de recherche*, IMAG-LMC, septembre 1999.
  - [AL00] A. ANTONIADIS, F. LEBLANC, « Wavelet Regression for Binary Response », *Statistics*, 35, 2000, p. 183–213.
  - [AGG97] A. ANTONIADIS, I. GIJBELS, G. GRÉGOIRE, « Model selection using wavelet decompositions and applications », *Biometrika* 84, 4, 1997, p. 751–763.
  - [AS01] A. ANTONIADIS, T. SAPATINAS, « Wavelet Shrinkage for Natural Exponential Families with Cubic Variance Functions », *Shankya*, 2001, à paraître.
  - [ALP02] A. ANTONIADIS, D. LEOPORINI, J.-C. PESQUET, « Wavelet Thresholding for Some Classes of non Gaussian Noise », *Statistica Neerlandica*, 2002, à paraître.
  - [Ant98] A. ANTONIADIS, « Change-Point Regression Models », *in: The art of nonparametric statistics*, UCL, Louvain-La-Neuve, Belgique, février 1998.
  - [AG02] A. ANTONIADIS, I. GIJBELS, « Detecting abrupt changes by wavelet methods », *Journal of Nonparametric Statistics*, 2002, à paraître.
  - [AGM00] A. ANTONIADIS, I. GIJBELS, B. MACGIBBON, « Nonparametric estimation for the location of a change-point in an otherwise smooth hazard function », *Scand. J. Statist.* 27, 2, 2000, p. 501–521.
  - [AFR98] A. ANTONIADIS, J. FERRER, M. ROTH, « Data Compression for Diffraction Patterns », *Acta*.

développé dans [AFG02] une méthode d'ondelettes pour résoudre le problème de Wicksell, cette dernière ayant fait l'objet d'une communication [30]. Toujours dans le cadre des problèmes inverses, nous avons modélisé l'évolution temporelle des pics journaliers d'ozone sur un site donné à l'aide de processus hilbertiens autorégressifs d'ordre 1 (ARH(1)), dont la prédiction est résolue par la recherche de la solution d'un problème inverse mal conditionné [50].

Plus récemment, nous nous sommes intéressés à l'application de méthodes de décomposition en ondelettes pour la résolution de problèmes plus généraux tels que l'analyse de la variance fonctionnelle [48], ainsi que pour des problèmes d'inférence de type poursuite [13], [49]. Nous avons également développé une méthode de classification non paramétrique fondée sur l'analyse en composantes indépendantes et sur des méthodes d'estimation non paramétriques d'une densité de probabilité multidimensionnelle [AAG00].

G. Grégoire s'est intéressé à l'inférence statistique pour les quantiles de régression dans le contexte de données censurées quand une seule covariable est présente [39]. Dans le cadre de l'étude des problèmes statistiques concernant les fonctions présentant des discontinuités, à la suite de la thèse de Zouhir Hamrouni soutenue en 1999 [Ham99] deux articles rédigés l'un sur le problème de l'estimation de la localisation et de l'amplitude d'une discontinuité, l'autre sur les problèmes de test sont à paraître [GH01, GH02]. Par ailleurs une collaboration avec des chercheurs de l'Université de Prague travaillant sur le sujet a été initiée à l'occasion du séjour de Marie Huskova invitée par l'équipe IDOPT. M. Huskova et G. Grégoire se sont intéressés aux problèmes de tests d'existence de rupture et plus généralement aux problèmes d'inférence statistique pour les ruptures dans le cadre des données dépendantes.

En résumé l'ensemble de ces travaux nous a permis :

- d'analyser le comportement de techniques d'identification fondées sur les ondelettes pour la résolution de problèmes inverses particuliers ;
- de développer des algorithmes de calcul rapide pour l'identification et de développer une boîte à outils MATLAB à cet effet [14] ;
- de bien cerner les problèmes susceptibles d'être résolus par de telles méthodes [Ant99] ;
- de proposer de nouvelles approches pour aborder des problèmes d'identification et de prédiction [ABF99].

---

*Cryst. Series D*, 54, 1998, p. 184–199.

- [AFG02] A. ANTONIADIS, J. FAN, I. GIJBELS, « A wavelet method for unfolding sphere size distributions », *Canadian J. of Statistics* 29, 2, 2002, p. 251–268, à paraître.
- [AAG00] U. AMATO, A. ANTONIADIS, G. GRÉGOIRE, « Independent Component Discriminant Analysis », *rapport de recherche*, IMAG-LMC, Sept. 2000.
- [Ham99] Z. HAMROUNI, *Inférence statistique par lissage linéaire local pour une fonction de régression présentant des discontinuités*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, janvier 1999.
- [GH01] G. GRÉGOIRE, Z. HAMROUNI, « Change point estimation by local linear smoothing », *Journal of Multivariate Analysis*, 2001, à paraître.
- [GH02] G. GRÉGOIRE, Z. HAMROUNI, « Two non-parametric tests for change-point problems », à paraître, 2002.
- [Ant99] A. ANTONIADIS, « Wavelets in Statistics: A Review », *Journal of the Italian Statistical Society* 6, 2, 1999, p. 97–144.
- [ABF99] A. ANTONIADIS, J. BERRUYER, A. FILHOL, « Estimation semi-paramétrique dans les familles doublement poissonniennes et application aux spectres de diffraction », *Revue de Statistique Appliquée*, 3, 1999, p. 57–80.

### 6.3 Méthodes multi-résolution et couplage de modèles en océanographie

**Participants :** Eric Blayo, Laurent Debreu, Véronique Martin.

Ce travail, motivé notamment par le développement actuel de l'océanographie côtière et de l'océanographie opérationnelle, vise à faciliter une adaptation locale de la physique et de la résolution dans les modèles numériques d'océan.

Nous avons dans un premier temps travaillé sur le développement d'une méthode de raffinement (éventuellement adaptatif) de maillage. Les potentialités de la méthode avaient été mises en évidence dans des configurations académiques [BD99], puis sur plusieurs modèles réalistes aux équations primitives : modèle de circulation générale OPA (LODYC, Paris 6), modèle régional ROMS (UCLA), modèle côtier MARS (IFREMER et SHOM). Différents aspects ont été plus particulièrement traités, concernant notamment les critères de raffinement, la prise en compte de contraintes physiques lors des phases d'interaction entre grilles, et les propriétés théoriques de stabilité et de convergence de la méthode. Ces travaux ont été accompagnés par le développement d'un logiciel Fortran 90 intégrant ces différents outils, et qui apporte à un modèle d'océan aux différences finies la capacité d'adapter son maillage, sans réécriture du modèle. Une première version de ce logiciel est utilisée actuellement dans plusieurs laboratoires, et une seconde version plus complète est en cours d'écriture.

Nous étendons maintenant ce travail à la problématique du couplage et de l'emboîtement de modèles océaniques distincts (pour réaliser par exemple un couplage modèle côtier/modèle hauturier). On se situe alors dans le cadre formel des méthodes de décomposition de domaine, dans lequel nous cherchons à développer des conditions d'interface permettant une amélioration de la physique du couplage pour un coût numérique abordable. Pour ce faire, nous travaillons d'une part d'un point de vue assez théorique sur des systèmes d'équations très simplifiés, et mettons en place d'autre part un cadre d'expérimentation réaliste (couplage d'un modèle du Golfe de Gascogne avec un modèle de l'Atlantique Nord) sur lequel seront réalisés nos tests numériques. Ce travail est mené en collaboration avec des chercheurs océanographes du LEGI à Grenoble (B. Barnier, S. Cailleau), des mathématiciens du LAGA-Paris 13 (L. Halpern, C. Japhet, V. Martin), et a reçu le soutien du SHOM et du programme Mercator.

### 6.4 Assimilation de données en océanographie

**Participants :** Didier Auroux, Eric Blayo, Jacques Blum, Sophie Durbiano, Blaise Faugeras, Ibrahim Hoteit, François-Xavier Le Dimet, Ioana Paun, Dinh Tuan Pham, Jacques Verron, Patrick Vidard.

**Techniques déterministes de contrôle optimal** Dans la continuité des travaux menés ces dernières années sur les techniques d'assimilation variationnelle dans les modèles de circulation océanique, nous travaillons depuis deux ans sur le problème de la réduction d'ordre dans les méthodes d'assimilation de données variationnelles, dans le cadre de la thèse de S. Durbiano. L'idée est de travailler avec des variables de contrôle appartenant à des espaces de dimension faible, afin de réduire le coût numérique de l'assimilation de données. A cette fin, une étude est

---

[BD99] E. BLAYO, L. DEBREU, « Adaptive mesh refinement for finite difference ocean models: first experiments », *J. Phys. Oceanogr.* 29, 1999, p. 1239–1250.

menée afin de comparer les possibilités offertes par différentes familles de vecteurs (singuliers, Lyapunov, “bred modes”, composantes principales) en tant que bases de l’espace de contrôle. Différents cas-tests sont exploités, avec un modèle simple idéalisé, et avec un modèle réaliste du Pacifique tropical.

L’intérêt de cette approche pour le contrôle de la condition initiale a été clairement démontré en utilisant une décomposition sur une base de composantes principales. Le coût de la méthode est divisé d’un ordre de grandeur, tout en améliorant la qualité des résultats obtenus grâce à l’apport de l’information statistique contenue dans les vecteurs de base.

De même, l’utilisation des “bred modes” dans les méthodes de filtrage de rang réduit (filtre SEEK, à base fixe ou évolutive) semble donner des résultats sensiblement meilleurs que ceux obtenus avec l’approche usuelle consistant à n’utiliser que des composantes principales.

Nous avons également tenté de mieux reconstituer la dynamique du modèle par l’introduction d’une variable de contrôle supplémentaire, représentant l’erreur du modèle. Notre étude montre que l’on doit traiter à part la partie stationnaire (le biais systématique). Ce contrôle supplémentaire permet, pour un coût de calcul identique, une nette amélioration des performances de l’assimilation de données, à la fois en terme d’écart aux observations, mais également en terme de prévision (Thèse de P. Vidard). On peut aussi ajouter un contrôle de la partie fluctuante de l’erreur du modèle, que les “bred modes” semblent alors représenter de façon satisfaisante.

Dans sa thèse, Ioana Paun a étudié la réduction d’ordre, pour le problème d’assimilation de données, sur un modèle quasi-géostrophique en décomposant la condition initiale dans une base d’ondelettes [11].

Il est possible d’observer par satellite la couleur de l’océan. L’information obtenue est étroitement liée à la concentration en phytoplancton à la surface de l’océan. Afin d’utiliser ces observations, des modèles d’écosystème marin ont vu le jour. Ceux-ci permettent de simuler l’évolution dans le temps et l’espace des concentrations de différents compartiments biologiques (phytoplancton, zooplancton, nutriment, détritus,...). Dans les équations apparaissent de nombreux paramètres qui sont des quantités très mal connues. Nous nous sommes proposés d’estimer ces paramètres à partir des observations. Pour résoudre numériquement ce problème inverse, une technique d’assimilation de données basée sur une méthode de contrôle optimal est employée. Elle consiste en la minimisation d’une fonction coût représentant l’écart entre la solution du modèle numérique et les observations. Les variables de contrôle sont les paramètres du modèle. Cette minimisation nécessite le calcul du gradient de la fonction coût. Ce dernier est calculé grâce au code adjoint obtenu avec l’aide du logiciel de différentiation automatique, Odyssee. Les résultats numériques montrent qu’il est difficile d’estimer tous les paramètres d’un tel modèle biologique [37].

### **Technique de filtrage stochastique**

Une autre approche du problème consiste à utiliser les méthodes de type filtrage.

Dans ce cadre, S. Carme a soutenu une thèse de doctorat sur l’implantation du filtre SEEK dans un modèle QG en Atlantique Nord<sup>[Car99]</sup>. D’autre part, ce filtre a été implanté dans des modèles aux équations primitives, à la physique plus complète et sa mise en œuvre a été réalisée,

---

[Car99] S. CARME, *Méthode d’assimilation de données par Filtrage de Kalman dans un modèle réaliste de l’Atlantique Nord*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, octobre 1999.

sa performance étudiée dans un cadre réaliste de l'océan Pacifique tropical<sup>[PVG98,VGP<sup>+</sup>97]</sup>.

Une variante du filtre SEEK a été introduite, qui s'appuie sur l'interpolation au lieu de la linéarisation et sur la technique de tirage Monte-Carlo exacte au second ordre. Ce filtre baptisé SEIK<sup>[Pha96,Pha97,PVG98]</sup>, outre sa plus grande stabilité, est plus simple à réaliser car il ne nécessite pas le calcul du gradient de l'opérateur de transition du modèle.

Un travail de synthèse sur ces différentes méthodes avec des expérimentations sur le modèle simple de Lorenz a été publié [28]. Ce travail pourra servir de base pour l'implantation de méthodes d'assimilation encore plus avancées dans des situations réalistes, où le modèle peut être fortement non-linéaire. Sur la réduction du coût de calcul, les pistes suivantes ont été explorées :

1. Mise à jour moins fréquente de la matrice du gain du filtre. On peut également envisager de faire évoluer la base de correction pendant les périodes d'instabilité où elle devrait évoluer rapidement ;
2. Dédoublage de la base de correction en lui ajoutant les vecteurs vitesse des trajectoires du système ;
3. utilisation d'une base de correction semi-évolutive, où seulement quelques vecteurs de base évoluent, les autres restant fixes.

Ces techniques ont été expérimentées dans le cadre d'un modèle océan de taille réelle du Pacifique tropical, ont donné des résultats satisfaisants<sup>[HPB00e,HPB00a,HPB00b]</sup> et ont fait l'objet d'un article soumis<sup>[HPB00f]</sup>. D'autre part nous avons également exploré l'utilisation de bases de correction locales, où les fonctions de base ont des supports localisés en espace. Cela est conforme à l'idée qu'une perturbation du système en un point spatial donné n'a pas ou a peu d'influence sur les points éloignés. Comme ce genre de base n'est pas adapté pour représenter les corrélations de longue portée, nous avons l'idée d'introduire des bases mixtes globale-locale.

- 
- [PVG98] D. PHAM, J. VERRON, L. GOURDEAU, « Filtres de Kalman singuliers évolutifs pour l'assimilation de données en océanographie », *C. R. Acad. Sci. Paris, Science de la terre et des planètes* 326, 1998, p. 255–260.
- [VGP<sup>+</sup>97] J. VERRON, L. GOURDEAU, D. PHAM, R. MURTUGUDDE, J. BUSALACCHI, « Une nouvelle implémentation du filtrage de Kalman appliqué à l'assimilation de données altimétriques dans un modèle de l'océan Pacifique tropical. », *Aviso News letter* 5, 1997.
- [Pha96] D. PHAM, « A singular evolutive interpolated Kalman filter for data assimilation in oceanography », *rapport de recherche n° RT 163*, LMC/IMAG, 1996.
- [Pha97] D. PHAM, « Dimension, Predictability and Reduced Rank Kalman Filtering in Data Assimilation », *in: Proceedings of the third bilateral French-Russian conference: Predictability of Atmospheric and Oceanic Circulations*, 1997.
- [HPB00e] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM, « A Efficient reduced Kalman filtering and application to altimetric data assimilation in tropical Pacific », *rapport de recherche n° 3937*, INRIA, mai 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3937.html>.
- [HPB00a] I. HOTEIT, D. PHAM, J. BLUM, « Efficient reduced Kalman filtering and application to altimetric data assimilation in oceanography », *in: European Geophysical Society General Assembly*, Nice, 2000.
- [HPB00b] I. HOTEIT, D. PHAM, J. BLUM, « Filtres de Kalman singuliers évolutifs (SEEK) simplifiés », *in: Atelier de Modélisation de l'atmosphère, AMA-2000*, Meteo-France, Toulouse, 2000.
- [HPB00f] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM, « A Efficient reduced Kalman filtering and application to altimetric data assimilation in tropical Pacific », soumis, 2000.

Ces bases non seulement peuvent avoir une plus grande représentativité mais ont l'avantage que sa partie globale peut être évolutive pour s'adapter au dynamique du système, la partie locale devant rester fixe si on ne veut pas perdre son caractère local. Ces idées ont également été expérimentées dans une configuration réaliste de l'océan Pacifique tropical et ont donné des résultats encore plus satisfaisants [HPB00g,HPB00c,HPB00d], qui font l'objet d'un article [18] et d'un article soumis [HPB00h].

La piste de l'utilisation d'une base de correction semi-évolutive semble la plus intéressante. Ainsi, nous pouvons atteindre une performance proche du filtre SEEK complet avec un dixième de coût de calcul. Une autre idée est l'usage d'une base de correction locale où les fonctions de base ont des supports localisés en espace, qui est justifié par le fait qu'une perturbation du système en un point spatial donné n'a pas ou a peu d'influence sur les points éloignés. Mais ce genre de base ne peut être rendu évolutif et n'est pas adapté pour représenter les corrélations de longue portée, ce qui nous conduit à construire des bases mixtes globale-locale, où la partie globale évolue pour s'adapter à la dynamique du système. Enfin, nous avons cherché à rendre le filtre plus robuste face aux non-linéarités du modèle. L'idée très simple consiste en l'utilisation d'un facteur d'oubli adaptatif, qui est plus fort quand le système est plus instable et dont la valeur varie en fonction de l'erreur de prévision et/ou l'énergie cinétique de l'océan. Les résultats des nos expérimentations sont fort encourageant. Il est également possible d'adapter l'évolution de la base de corrections pour faire face aux instabilités du système. Cela permet dans beaucoup de cas d'améliorer encore la performance du filtre.. Tous ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse d'I. Hoteit, soutenu en janvier 2001 [9]. Les résultats sont très encourageants. I. Hoteit a pu réaliser des expériences d'assimilation dans le modèle aux équations primitives OPA (qui est relativement complexe) dans le cadre assez réaliste de l'océan Pacifique tropical, sur *un simple PC de bureau*. Ses résultats ont fait l'objet d'un article [18], de deux rapports de recherche [HPB00e,HPB00g], de deux articles soumis [HPB00h] et de plusieurs conférences [HPB00a,HPB00c,HPB00d,HPB00b]. Depuis sa thèse, I. Hoteit a continué à travailler dans le domaine. Il a, par exemple, appliqué l'idée d'adaptation pour faire évoluer le nombre de vecteurs de la base de correction du filtre, afin d'optimiser encore sa performance. Ces nouveaux travaux ont aussi fait l'objet de deux rapports de recherche INRIA [52, 51], de deux articles soumis [HP01b,HP01a] et de deux conférences [40, 41]. Enfin, des expériences d'assimilation encore plus ambitieuses dans le cadre bien réaliste du modèle OPA à haute

- 
- [HPB00g] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM, « A Semi-evolutive filter with partially local correction basis for data assimilation in oceanography », *rapport de recherche n° 3975*, INRIA, juillet 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3975.html>.
- [HPB00c] I. HOTEIT, D. PHAM, J. BLUM, « Reduced order schemes for data assimilation in oceanography based on in the Kalman filter », *in: 14th Science Meeting*, Beyrouth, 2000.
- [HPB00d] I. HOTEIT, D. PHAM, J. BLUM, « A semi-evolutive filter with partially local correction basis for data assimilation in oceanography », *in: Fourth International marine environmental modelling seminar, IMEMS 2000*, p. 15, Athens, 2000.
- [HPB00h] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM, « A Semi-evolutive filter with partially local correction basis for data assimilation in oceanography », soumis, 2000.
- [HP01b] I. HOTEIT, D. T. PHAM, « Evolutivity of the reduced state space and data assimilation schemes based on the Kalman filter », soumis, septembre 2001.
- [HP01a] I. HOTEIT, D. T. PHAM, « An adaptively reduced order extended Kalman filter for data assimilation in the tropical pacific », soumis, 2001.

résolution en Atlantique nord, ont déjà commencé.

Par ailleurs, nous essayons de renforcer la stabilité du filtre et sa robustesse vis-à-vis de la non-linéarité. Nous envisageons également de mettre en œuvre des techniques plus avancées pour le filtrage non-linéaire utilisant aussi le tirage Monte-Carlo exact au second ordre [Pha98]. Nous avons également entrepris une synthèse des méthodes stochastiques susceptible de mieux se comporter dans les cas des modèles fortement non-linéaires [28]. Ces méthodes ont été testées dans le cadre du modèle de Lorenz simple, mais leur application dans une configuration réaliste reste encore trop coûteuse.

### Techniques hybrides

Une nouvelle méthode d'assimilation de données (4D-Var/SEKS), combinant les approches par contrôle optimal et par filtrage stochastique, a été conçue par F. Veersé [Vee99]. Elle utilise la technique de réduction de la dimension de l'espace de contrôle pour le calcul d'une correction à l'état du modèle, et une technique inspirée de celle du filtre SEEK pour le calcul des statistiques d'erreur nécessaires à l'assimilation. Le point fort de cette méthode est sa consistance, puisque le calcul de la correction et celui des statistiques d'erreur reposent sur une hypothèse commune de rang faible des matrices de covariances d'erreur. Cette méthode inclut en outre un préconditionnement du problème de contrôle, ce qui s'avère nécessaire pour des applications à des modèles océaniques réalistes ou des modèles météorologiques opérationnels. Elle permet également de pallier un défaut majeur des méthodes d'assimilation variationnelle actuelles, en fournissant des statistiques d'erreur dépendant de l'écoulement sous-jacent. Le coût de cette méthode en terme de temps de calcul et d'espace mémoire est du même ordre que celui du filtre SEEK décrit précédemment. Une mise en œuvre du 4D-Var/SEKS avec un modèle aux équations primitives de l'océan Pacifique tropical est envisagée [VPV00,VA00].

## 6.5 Sensibilité des attracteurs aux influences extérieures

**Participant** : Eugene Kazantsev.

Les méthodes de prévision de perturbations climatiques utilisées actuellement sont basées en majorité sur une technique *a posteriori*. On doit définir d'abord le facteur qui peut influencer le climat du modèle. Ensuite, on intègre le modèle afin d'obtenir sa réponse à la perturbation de ce facteur. Cette approche ne nous permet pas de répondre à la question : "Quelle perturbation de paramètres du modèle provoque le plus grand changement de son climat?".

Une méthode inverse a été proposée pour déterminer la perturbation la plus dangereuse pour les valeurs climatiques du modèle. Cette méthode réalise une approche *a priori* de prévi-

- 
- [Pha98] D. PHAM, « Stochastic Methods for Sequential Data Assimilation in Strongly Nonlinear Systems », *rapport de recherche n° 3597*, INRIA, décembre 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3597.html>.
  - [Vee99] F. VEERSÉ, « 4D-Var/SEKS: a consistent variational-filtering data assimilation method », soumis, 1999.
  - [VPV00] F. VEERSÉ, D. PHAM, J. VERRON, « 4D-Var/SEEK: A Consistent Hybrid Variational-Smoothing Data Assimilation Method », *rapport de recherche*, INRIA, mars 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3902.html>.
  - [VA00] F. VEERSÉ, D. AUROUX, « Some Numerical Experiments on Scaling and Updating L-BFGS Diagonal Preconditioners », *rapport de recherche*, INRIA, janvier 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3858.html>.

sion de changements du climat du modèle. Elle consiste en l'utilisation des orbites périodiques instables si elles existent sur l'attracteur du modèle. On a formulé une approche linéaire qui permet de faire le lien entre les petites perturbations des paramètres du modèle, ses orbites périodiques et les valeurs climatiques de la solution du modèle sur l'attracteur.

L'idée générale consiste à remplacer les moyennes statistiques de la solution du modèle sur l'attracteur par les approximations obtenues avec des orbites périodiques. Cette méthode permet la construction d'une matrice qui fait le lien entre la perturbation du seconde membre du modèle et sa moyenne climatique.

Cette approche a été appliquée au modèle de Lorenz [20] et au modèle barotrope de circulation océanique [19].

Les résultats de l'approximation ont été comparés avec la simulation directe. La comparaison montre une bonne coïncidence de valeurs obtenues par l'approche linéaire et par le calcul direct.

## 6.6 Ecoulements à surface libre

**Participants :** Pierre Saramito, Jérôme Monnier, Jocelyn Etienne, Claire Lauvernet.

### 6.6.1 Surface libre et phénomènes capillaires

Les écoulements de fluides à surface libre avec forces capillaires interviennent dans un grand nombre de procédés de mise en forme de matériaux : extrusion de fibres, fils et membranes, injection dans des moules, enduction de produits sur des surfaces, jets d'encre, décollement d'adhésifs. . .

Les matériaux en présence sont fréquemment non-newtoniens et seront décrits par des modèles viscoélastiques. La compétition entre forces capillaires et contraintes viscoélastiques conduit à des phénomènes bien spécifiques. Pour fixer les idées, considérons tout particulièrement le cas du gonflement en sortie de filière et cherchons à répondre à la question suivante : Comment choisir le rayon de la filière et le débit d'entrée pour obtenir un fil de rayon donné ?

Nous reconnaissons un problème inverse que nous aborderons sous la forme d'un problème de contrôle optimal : il s'agit de contrôler numériquement des écoulements viscoélastiques avec tension de surface. Citons, également, à titre de seconde application possible, le pelage d'un ruban adhésif. Il s'agit alors d'optimiser les propriétés de l'adhésif afin que le substrat (mur, peau, . . .) soit exempt de produit (rupture adhésive). D'autres applications concernent la coalescence, l'enduction, les interfaces fluide-fluide.

Ce thème de recherche a fait l'objet du stage de DEA de Jocelyn Etienne [56].

### 6.6.2 Avalanches et coulées de boue

La prévention des risques en montagne, des avalanches aux coulées de boue, passe par des simulations numériques de plus en plus poussées. Ces dernières mettent en œuvre des lois de comportement de matériaux complexes, comme les fluides à seuil ou les écoulements

granulaires <sup>[RMS00,RS01]</sup>, [29] ainsi que des méthodes numériques délicates : volumes finis dans un cadre dynamique, maillages adaptatifs. Les essais peuvent être faits avec la montagne seule, ou en présence d'ouvrages d'art (pare-avalanches, déviateurs, digues) dont on cherche à ajuster la position.

Les modèles sont de type viscoplastique ou granulaire, moyennés dans l'épaisseur (approche du type Saint-Venant). Une adaptation du maillage à la topographie sera développée pour rendre les modèles plus précis et plus efficaces. Elle pourra également permettre de concentrer les calculs dans les régions d'intérêt : le front de l'avalanche ou de la coulée, le voisinage des variations brusques du relief, digue ou bien arêtes de rochers.

Ce thème de recherche a fait l'objet du stage de DEA de Claire Lauvernet [57]. Une collaboration avec le LEGI (Emil Hopfinger), le Cemagref (Dominique Laigle, Mohamed Naaim) et le laboratoire Gravir (Marie-Paule Cani, Fabrice Neyret) débute également, avec le soutien financier de l'INRIA (Action de Recherche Coopérative) et de l'INPG (Bonus Qualité Recherche). Jocelyn Etienne débute actuellement une thèse sur le thème des avalanches de neige poudreuse (aérosol).

## 6.7 Hydrologie

**Participants :** François-Xavier Le Dimet, Junqing Yang, Minghui Yu, Cyril Mazauric, Victor Shutayev, Pierre Ngnepieba.

**Problèmes d'identification.** Ce travail entre dans le cadre de la thèse de Pierre Ngnepieba. Nous avons abordé plusieurs points, notamment l'aspect théorique et les méthodes informatiques pour résoudre les problèmes d'identification des paramètres hydrodynamiques dans un modèle hydrologique (modèle de Richards) en utilisant les techniques d'assimilation de données.

Au cours de nos différentes expériences de minimisation avec MIQN3, nous avons constaté la grande sensibilité de certains paramètres (conductivité hydraulique à saturation naturelle, taux d'humidité à saturation) sur la fonction objective ce qui nous pousse à la recherche des informations du second ordre pour l'analyse de sensibilité et à la caractérisation de l'unicité de nos paramètres de contrôle.

Parallèlement, une collaboration est entreprise avec des hydrologues du Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE). La question est de faire de l'identification sur un modèle d'infiltration robuste se basant sur le modèle d'infiltration de GREEN et AMPT, le nombre de paramètres du modèle étant faible.

**Problème de sédimentation.** Ce travail est réalisé dans le cadre de la thèse de Junqing Yang (Université de Wuhan et UJF). Le problème auquel nous nous intéressons est l'assimi-

---

[RMS00] N. ROQUET, R. MICHEL, P. SARAMITO, « Errors estimate for a viscoplastic fluid by using  $P_k$  finite elements and adaptive meshes », *C. R. Acad. Sci. Paris, Série I 331*, 7, 2000, p. 563–568.

[RS01] N. ROQUET, P. SARAMITO, « An adaptive finite element method for bingham fluid flows around a cylinder », soumis, 2001.

lation de données pour les problèmes du transport des sédiments dans des rivières [JL98]. Un modèle bi-dimensionnel gouvernant le système hydraulique est déduit des lois de conservation de masse et d'énergie, il est développé par le LASG de l'Institut de Physique de l'Atmosphère (Académie des Sciences, Chine) : c'est un système couplé de trois équations aux dérivées partielles ; l'écoulement fluvial est régi par une équation de type Saint-Venant ; le contenu en sédiment vérifie une équation de concentration, une loi empirique permet d'évaluer la déposition des sédiments. Pour compléter ces équations, des formules semi-empiriques sont utilisées pour déterminer les variables physiques comme la capacité de transport solide et le taux de transport solide par unité de largeur. En discrétisant avec une méthode de différences finies adaptée à un maillage de «grille-C», nous résolvons numériquement les équations de Saint-Venant avec un algorithme à pas fractionnaire. Nous avons prouvé la stabilité et la convergence de cette méthode, ainsi que la conservation d'énergie des différences, qui permet une stabilité du calcul sur une longue période de temps.

Le premier problème est de reconstituer l'évolution du lit de la rivière à partir d'observations et de la connaissance de la physique de l'écoulement. Pour cela on utilise des techniques de type contrôle optimal. A partir du système adjoint développé du système direct, on peut déduire le gradient d'une fonctionnelle, qui mesure l'écart entre la prévision du modèle et l'observation, par rapport aux variables de contrôle. L'algorithme d'optimisation est la méthode quasi-Newton à mémoire limitée. De plus, en utilisant le même système adjoint, nous avons identifié quelques coefficients empiriques difficiles à spécifier. La méthode de pénalisation est utilisée pour traiter les cas où les données observées ne sont pas complètes.

En hydrologie de surface, la collaboration avec l'université d'Oklahoma porte sur l'assimilation de données hydrologiques et les problèmes inverses en hydrologie. La représentation déterministe des processus hydrologiques distribués nécessite la calibration de nombreux paramètres avec un nombre limité d'observations. Les techniques de type commande optimale ont été mises en oeuvre pour l'identification de la rugosité hydraulique et de l'infiltration dans un modèle de type onde cinétique.

En météorologie, une coopération ancienne avec Florida State University et le Département de météorologie de cette université a été relancée dans le domaine des modèles mésosynoptiques avec MM5 développé à Penn State et au NCAR. À FSU l'adjoint de MM5 a été écrit avec la physique complète. Plusieurs problèmes sont abordés : le contrôle des conditions aux limites pour l'assimilation de données, la sensibilité à la condition initiale, la dépendance de la prévision par rapport aux erreurs d'observations, enfin le couplage avec un modèle hydrologique. Par ailleurs une étude de la méthode de breeding a été réalisée avec un modèle couplé océan-atmosphère. Il s'agit de déterminer les modes correspondant à la plus grande amplification d'une perturbation. Les résultats sont très caractéristiques de l'interaction océan-atmosphère et font apparaître la genèse de phénomènes comme "El Nino". Ce travail s'est effectué en collaboration avec le Laboratoire de Météorologie Dynamique (H. Le Treut).

---

[JL98] Y. JUNQING, F.-X. LE DIMET, « Variational data Assimilation in the transport of sediment in river », *Science in China (Series D)* 41, 1998, p. 473–485.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Contrats nationaux

Une collaboration déjà ancienne existe avec le Département de Recherche sur la Fusion Contrôlée du Centre d'Études Nucléaires de Cadarache sur les problèmes d'identification et de contrôle en physique des plasmas. Un nouveau contrat vient d'être signé avec le CEA (Cadarache) sur le problème d'identification en temps réel de la densité du courant dans TORE SUPRA.

Un contrat avec le SHOM (Service Hydrographique de la Marine) traite des méthodes de maillage adaptatif et de zoom pour la circulation océanique (voir section 6.3).

Le développement des télécommunications nécessite la mise au point d'algorithmes fiables et rapides. Vincent Janicot a fait son stage de DEA sur le préconditionnement de tels algorithmes ; ce travail se poursuit en thèse CIFRE à la société ANACAD sous la direction de F.-X. Le Dimet.

### 7.2 Contrats internationaux

**Participants** : François-Xavier Le Dimet, Cyril Mazauric, William Castaing, Juqing Yang, Minghui Yu.

Le projet IDOPT est partenaire du projet ANFAS.

Ce projet associe :

- l'Institut d'Informatique de l'Académie des Sciences de Chine,
- l'Université de Reading (U. K.),
- l'Université d'Oxford (U. K.),
- FORTH (Grèce),
- l'Université de Wuhan (Chine),
- l'Institut de physique de l'Atmosphère de l'Académie des Sciences de Chine.

Son but est la mise au point d'un système d'aide à la décision pour les inondations. L'INRIA est responsable du Work Package 3 (Modélisation). Le programme développé par IDOPT comprend :

- l'adaptation des modèles à des sites (Loire, Vah, Yangtsé)
- la mise au point de méthodes d'assimilation de données pour les inondations.
- la parallélisation de codes d'hydraulique.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions régionales

Collaborations avec des équipes de recherche régionales :

- Équipe MEOM (Modélisation des Écoulements Océaniques et des Marées) du Laboratoire d'Écoulements Géophysiques et Industriels (Grenoble) : océanographie.

- Laboratoire de Transferts en Hydrologie et Environnement (Grenoble) : problèmes inverses en hydrologie.
- Département d'études des matériaux, section d'études de la solidification : CENG (Centre d'Études Nucléaires de Grenoble).
- Institut Laue-Langevin, Institut de Biologie Structurale du CENG et ESRF (Synchrotron) : méthodes stochastiques pour les problèmes inverses.
- Pechiney : Centre de recherche de Voreppe.

## 8.2 Actions nationales

L'ARC MEDEE. Modèles et données sont les deux composantes de la prévision il s'agit de voir les adéquations données <-> modèles et d'estimer : quelles sont les données les mieux adaptées à un modèle et quel est le modèle le plus adéquat à un ensemble de données existant. Le travail se fait en collaboration avec l'Ecole des Ponts (Bruno Sportisse) et le projet INRIA AIR (Isabelle Herlin, Alain Berroir). Deux thèses sont en cours sur ce thème : une sur les milieux poreux non saturés (Pierre Ngnepieba (UJF)), et une autre à l'ENPC sur la chimie atmosphérique. Deux chercheurs Victor Shutaiev et Mikhail Tsyroulnikov ont passé plusieurs mois dans IDOPT pour travailler sur ce problème du pont de vue déterministe (V. Shutayev) et stochastique (M. Tsyroulnikov).

Interactions avec d'autres projets ou actions INRIA :

- PROJET APACHE : parallélisation d'algorithmes.
- PROJET NUMATH : océanographie.
- PROJET PARA : mode inverse opérationnel.
- PROJET ESTIME : algorithmes d'optimisation, mode inverse opérationnel.
- ACTION TROPICS : dérivation automatique d'un code adjoint (ODYSSÉE), mode inverse opérationnel.
- PROJET SINUS : mode inverse opérationnel.

Collaborations avec d'autres équipes de recherche en France :

- Participation au programme national de recherche MERCATOR (océanographie).
- Laboratoire de Météorologie Dynamique de l'ENS (Paris) : assimilation de données pour l'environnement.
- CEA Cadarache.
- Centre National de Recherche Météorologique, Météo-France (Toulouse) : assimilation de données pour les modèles atmosphériques.

Participation à des Groupements de Recherche (GdR) CNRS :

- GdR SPARCH (simulation de faisceaux de particules chargées)
- GdR Optimisation de forme.
- GdR Fluides en interaction.

## 8.3 Actions européennes

### 8.3.1 Europe de l'ouest

Collaboration de A. Antoniadis et G. Grégoire avec les professeurs I. Gijbels et A. Kneip de l'Institut de Statistique de Louvain-La-Neuve. Collaboration de A. Antoniadis avec le

Dr. Umberto Amato du CNR Italien (Naples). Collaboration de A. Antoniadis avec le Dr. Sylvain Sardy (École Polytechnique Fédérale de Lausanne).

F.-X. Le Dimet participe au projet européen ECRASE (modélisation en hydrologie) et au projet européen PIONEER (océanographie côtière). Il est membre de l'Education Board d'ECMI (European Consortium for Mathematics in Industry).

Collaboration de F. Veersé avec M. Losch et le docteur J. Schröter de l'Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (Bremerhaven). F. Veersé collabore également avec les docteurs J. Barkmeijer et M. Fisher du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (Reading).

- Programme européen ANFAS (voir le site web) : il s'agit d'une action dans le cadre de la DGXIII. Ce programme sino-européen est destiné à fournir des outils d'aide à la décision dans le cas d'inondation. Le projet IDOPT a la responsabilité du sous-programme modélisation et assimilation de données. Eu égard à la complexité des phénomènes mis en jeu : météorologie, hydrologie de surface et souterraine les développements se feront à moyen et long terme. Il est clair que la mise en œuvre de ce programme demandera des collaborations multiples. Une thèse (Cyril Mazauric) a débuté sur ce thème. Deux chercheurs post-doc (Yang Junqing, Yu Minghui) travaillent actuellement dans ce cadre. Les partenaires européens du projet ANFAS sont l'Académie Slovaque des Sciences, FORTH (Grèce), l'Université de Reading (UK), Matra Data Systems, BRGM.

### 8.3.2 Europe de l'est

IDOPT participe au programme "Mathématiques pour l'étude du climat" de l'Institut Franco-Russe Lyapunov (Moscou).

## 8.4 Actions internationales

### 8.4.1 Afrique

Une collaboration s'est mise en place sur les méthodes numériques en hydrologie avec l'université de Yaoundé. Cette collaboration est concrétisée par la thèse en co-tutelle de P. Ngnepieba.

### 8.4.2 Amérique du Nord

Sur le thème "physique des plasmas" : collaboration avec M. Vogelius (Rutgers university). Sur le thème "environnement" : F.-X. Le Dimet collabore avec l'université d'Oklahoma et le Florida State Institute dans le domaine de la météorologie et de l'hydrologie. Celle-ci s'est traduite par 5 stages d'étudiants qui ont réalisé des projets de recherche dans des labora-

toires [Mou99,Omo99,Bla99,Cas99,Tam99,ZNHD01]. Dans le cadre du nouveau Centre of Computational Sciences and Engineering de Florida State University nous avons commencé à développer un nouveau programme en mécanique des fluides numérique. Le but est d'utiliser les données pour contrôler les écoulements simulés par les modèles, et en particulier leur énergie turbulente [Le 99].

Sur le thème "techniques stochastiques" : collaboration d'A. Antoniadis avec le professeur R. Carmona (Princeton university), le professeur McKeague (université de Floride), le professeur J. Fan (université de Caroline du Nord, Chapel Hill) et le Professeur B. MacGibbon (université du Québec à Montréal).

Une "équipe associée" est réalisée avec le Florida State University (professeur Hussaini). Le programme de coopération porte sur :

- Les fluides géophysiques (L. Debreu)
- L'assimilation de données ( F.-X Le Dimet)
- Statistiques (A. Antoniadis).
- Propagations des erreurs dans les modèles (P. Ngnepieba)

Des échanges de chercheurs (F.-X. Le Dimet et P. Ngnepieba) sont en cours.

### 8.4.3 Chine

La collaboration entre l'Institut de Physique de l'Atmosphère (Académie des Sciences de la R. P. de Chine) et IDOPT a été retenue comme un projet du Laboratoire Franco-Chinois LIAMA. La collaboration va s'étendre à l'étude des modèles et méthodes de prévision des inondations.

Programme ARMA (LIAMA, CIRAD). La collaboration engagée avec Philippe de Reffye s'est poursuivie par un stage de DEA (Romain Nosenzo) réalisé au LIAMA pendant l'été 2000. Une thèse franco-chinoise consacrée au contrôle de la modélisation des plantes a commencé en 2001 (thèse de Wu Lin). Les techniques de type contrôle optimal seront appliquées à l'étude de la croissance des plantes.

La coopération avec l'Institut de Physique de l'Atmosphère de l'Université de Wuhan se réalise dans le cadre du projet ANFAS (voir la rubrique 7.2).

- 
- [Mou99] J. MOUNIER, « Comparison of two hydrologic infiltration models », 1999, Rapport EMGIS, University of Oklahoma.
- [Omo99] S. D. OMO, « Compact Finite-Difference schemes for the Dynamic Wave Routing », 1999, Rapport EMGIS, University of Oklahoma.
- [Bla99] A. BLANC, « Incorporation of Side Constraint in a Minimum Variance Unbiased Estimation Procedure », 1999, Rapport EMGIS, University of Oklahoma.
- [Cas99] W. CASTAING, « Solving singularly perturbed reaction-diffusion equations using mesh refinement strategies », 1999, Rapport Super Computer Research Institute, FSU, Tallahassee.
- [Tam99] C. TAMET, « Comparison of several minimization procedures for nonlinear problems », 1999, Rapport Super Computer Research Institute, FSU, Tallahassee.
- [ZNHD01] L. ZHIJIN, I. NAVON, M. HUSSAINI, F.-X. L. DIMET, « Optimal control of cylinder wakes via suction and blowing », À paraître.
- [Le 99] F.-X. LE DIMET, « Data Assimilation and Sensitivity with respect to observations », *rapport de recherche n° 1999-11-08*, NASDA report, Tokyo, 1999.

## 8.5 Visites, et invitations de chercheurs

- Marina KLEPTSZYNA (Russie) 3 mois,
- Patrick MARCHESIELLO (USA) 3 mois,
- Victor SHUTAIEV (Russie) 2 mois
- Mikhail TSYROULNIKOV (Russie) 4 mois
- Junqing YANG (Chine) année 2000 + 6mois en 2001
- Minghui YU (Chine) 4 mois

## 9 Diffusion de résultats

### 9.1 Animation de la Communauté scientifique

A. Antoniadis est membre du bureau éditorial de la revue de l'*ISUP* depuis 1992.

A. Antoniadis est éditeur associé du Journal de la Société Française de Statistique depuis 1998. J. Blum est rédacteur en chef adjoint de la revue électronique ESAIM : COCV (*Control, Optimization and Calculus of Variations*).

J. Blum est membre du conseil des partenaires du CGCV (Centre Grenoblois de Calcul Vectoriel du CEA), et membre du conseil scientifique du PSMN (Pôle de Simulation et de Modélisation Numérique) de l'ENS Lyon.

D. T. Pham est rédacteur en chef adjoint de la revue *Journal of Time Series Analysis* depuis 1992.

F.-X. Le Dimet est membre du Comité scientifique du projet européen PIONNER et du Comité scientifique du GIR ECOFOR.

F.-X. Le Dimet est membre du Educational Board d'ECMI

F.-X. Le Dimet est membre du Conseil de l'UFR IMA

F.-X. Le Dimet est membre du Conseil scientifique de l'UJF.

### 9.2 Enseignement

Il y a un lien fort avec le DEA de Mathématiques Appliquées de l'université Joseph Fourier et de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (ENSIMAG), car la plupart des membres du projet y donnent des cours, et parce que c'est le vivier de nos étudiants en stage de DEA et en thèse. Parmi les cours enseignés par les membres du projet, on peut citer :

- Modélisation numérique et EDP. Applications micro-électronique et hydrodynamique. (24 heures, J. Monnier) ;
- Ondelettes et applications (12 heures, A. Antoniadis) ;
- Méthodes d'estimation fonctionnelle (12 heures, G. Grégoire) ;
- Modélisation et calcul d'interface (12 heures, P. Saramito) ;

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

Des membres de l'équipe ont participé à des conférences et *workshops* ; on se reportera à la bibliographie pour en avoir la liste.

## 10 Bibliographie

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

- [1] A. ANTONIADIS, « Wavelets in Statistics : A Review », *in : Invited discussion paper by the Italian Statistical Society*, ISS, Rome, Italie, 1997.
- [2] E. BLAYO, J. VERRON, J. MOLINES, « Assimilation of Topex/Poseidon altimeter data into a circulation model of the North Atlantic. », *J. Geophys. Res.* 99, 1994, p. 24691–24705.
- [3] J. BLUM, H. BUVAT, « An inverse problem in plasma physics : the identification of the Current Density Profile in a Tokamak », *in : Large-Scale Optimization with Applications, Part 1 : Optimization in Inverse Problems and Design, IMA Volume in mathematics and its applications 92*, Springer, 1997, p. 17–36.
- [4] J. BLUM, *Numerical Simulation and Optimal Control in Plasma Physics*, Wiley/Gauthier-Villars Series in Modern Applied Mathematics, 1989.
- [5] F.-X. LE DIMET, O. TALAGRAND, « Variational Algorithms for Analysis and Assimilation of Meteorological Observations. Theoretical Aspect », *Tellus 38A*, 1986, p. 97–110.
- [6] B. LUONG, J. BLUM, J. VERRON, « A variational method for the resolution of a data assimilation problem in oceanography », *Inverse Problems 14*, 1998, p. 979–997.
- [7] D. PHAM, J. VERRON, M. C. ROUBAUD, « A Singular Evolutive Extended Kalman Filter for Data Assimilation in Oceanography », *Journal of Marine Systems 16*, 3 & 4, 1998, p. 323–340.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [8] S. DURBIANO, *Vecteurs caractéristiques de modèles océaniques pour la réduction d'ordre en assimilation de données*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, décembre 2001.
- [9] I. HOTEIT, *Filtres de Kalman réduits et efficaces pour l'assimilation de données en océanographie*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, janvier 2001.
- [10] P. NGNEPIEBA, *Assimilation de données et Identification de paramètres : une application en hydrologie*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, décembre 2001.
- [11] I. PAUN, *Sur quelques problèmes régis par des équations aux dérivées partielles en astrophysique et en océanographie*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, octobre 2001.
- [12] P. VIDARD, *Vers une prise en compte des erreurs modèle en assimilation de données 4D-variationnelle. Application à un modèle réaliste d'océan.*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, décembre 2001.

### Articles et chapitres de livre

- [13] U. AMATO, A. ANTONIADIS, « Adaptive wavelet series estimation in separable nonparametric regression models », *Statistics and Computing 11*, 2001, p. 373–394.
- [14] A. ANTONIADIS, J. BIGOT, T. SAPATINAS, « Wavelet Estimators in Nonparametric Regression : A Comparative Simulation Study », *Journal of Statistical Software 6*, 2, 2001, p. 1–57.
- [15] A. ANTONIADIS, J. FAN, « Regularization of Wavelets Approximations (with discussion) », *Journal of the American Statistical Association 96*, 455, 2001, p. 939–963.
- [16] A. ANTONIADIS, T. SAPATINAS, « Wavelet Shrinkage for Natural Exponential Families with Quadratic Variance Functions », *Biometrika 88*, 3, 2001, p. 805–820.

- [17] I. CHARPENTIER, « Checkpointing Schemes for Adjoint Codes : Application to the Meteorological Model Meso-NH », *SIAM Journal on Scientific Computing* 22-6, 2001, p. 2135–2151.
- [18] I. HOTEIT, D. PHAM, J. BLUM, « A semi-evolutive partially local filter for data assimilation », *Marine Pollution Bulletin* 43, 2001, p. 164–174.
- [19] E. KAZANTSEV., « Sensitivity of Attractor to external influences : Approach by Unstable Periodic Orbits. », *Chaos, Solitons & Fractals* 12, 11, 2001, p. 1989–2005.
- [20] E. KAZANTSEV, « Sensitivity of the attractor of the barotropic ocean model to external influences : Approach by Unstable Periodic Orbits. », *Nonlinear Processes in Geophysics*, 8, 2001, p. 281–300.
- [21] M. KLEPTSZYNA, A. LE BRETON, « Optimal linear filtering of general multidimensional Gaussian processes – Application to Laplace transforms of quadratic functionals », *Journal of Applied Mathematics and Stochastic Analysis* 14, 3, 2001, p. 215–226.
- [22] M. KLEPTSZYNA, A. LE BRETON, « Some explicit statistical results about elementary fractional type models », *Nonlinear Analysis – Theory, Methods and Applications* 47, 7, 2001, p. 4783–4794.
- [23] F.-X. LE DIMET, V. SHUTAYEV, « On Newton methods in data assimilation », *Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling* 15, 5, 2001, p. 419–434.
- [24] F.-X. LE DIMET, V. SHUTYAEV, « On data assimilation for quasilinear parabolic problems », *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling* 16, 3, 2001, p. 247–259.
- [25] J. MONNIER, J. P. . VILA, « Convective and radiative thermal transfer with multiple reflections. Analysis and approximation by a finite element method. », *Math. Models. Meth. Appl. Sc.* 11, 2, 2001.
- [26] J. MONNIER, « A shape optimal design problem with convective and radiative thermal transfer. Analysis and implementation », *J. Optim. Th. Appl.* 110, 1, 2001.
- [27] R. NOSENZO, P. DE REFFYE, F. BLAISE, F.-X. LE DIMET, « Modèles mathématiques de conduite culturale », in : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, E. Maézieux, G. Trébuil, et M. Jaeger (éditeurs), CIRAD INRA, 2001.
- [28] D. T. PHAM, « Stochastic methods for sequential data assimilation in strongly nonlinear systems », *Monthly Weather Review* 129, 5, may 2001.
- [29] P. SARAMITO, N. ROQUET, « An adaptive finite element method for viscoplastic fluid flows in pipes », *Comput. Meth. Applied Mech. Eng.* 190, 2001, p. 5391–5412.

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

- [30] A. ANTONIADIS, J. FAN, I. GIJBELS, « A wavelet method for unfolding sphere size distributions », in : *International Workshop on Statistics of Inverse Problems*, Paris, 2001.
- [31] A. ANTONIADIS, J. FAN, « Regularization by Wavelet Approximation », in : *Joint Statistical Meeting*, Atlanta, 2001.
- [32] A. ANTONIADIS, J. FAN, « Wavelet networks and Graduated non convexity algorithms for model selection », in : *Joint Statistical Meeting*, Atlanta, 2001.
- [33] E. BLAYO, L. DEBREU, B. BARNIER, « Maillage adaptatif et méthodes de zoom pour la modélisation des circulations océaniques », in : *Rencontres DI'MOD 2001 "modélisation distribuée"*, Villetaneuse, 2001.
- [34] E. BLAYO, L. DEBREU, « Multiresolution approach and model nesting in ocean modelling », in : *SIAM Conference on mathematical and computational issues in the geosciences*, Boulder, 2001.

- [35] I. C. D. QUELO, J.-P. BERROIR, B. SPORTISSE, « Some aspect of adjoint modellin for air quality model », in : *Air Pollution Modelling and Simulation (APMS'01)*, Paris, april 2001.
- [36] R. DJOUAD, B. SPORTISSE, N. AUDIFFREN, I. CHARPENTIER, « Numerical integration of aqueous phase chemistry », in : *Air Pollution Modelling and Simulation (APMS'01)*, Paris, april 2001.
- [37] B. FAUGERAS, J. BLUM, J. VERRON, M. LEVY, I. CHARPENTIER, « Parameter estimation in a coupled ocean and ecosystem model », in : *Liège international Colloquium on Ocean Hydrodynamics*, Liège, may 2001.
- [38] B. FAUGERAS, J. BLUM, J. VERRON, « Estimation de paramètres dans modèle d'écosystème marin », in : *Congrès National de Mathématiques Appliquées et Industrielles*, Pompadour (Corrèze), may 2001.
- [39] G. GRÉGOIRE, « Nonparametric regression quantile for censored data », in : *International Workshop on Quantile Regression*, Liberec, Tchèque, 2001.
- [40] I. HOTEIT, D. PHAM, « An adaptively reduced order extended Kalman filter for data assimilation in the tropical pacific », in : *Fifth International marine environmetal modelling seminar, IMEMS 2001*, New Orleans, 2001.
- [41] I. HOTEIT, D. PHAM, « Evolutivity of the reduced state space and data assimilation scheme based on the Kalman filter », in : *8th International Meeting on Statistical Climatology*, Lüneburg, 2001.
- [42] F.-X. LE DIMET, C. MAZAURIC, W. CASTAINGS, « Numerical models for the study of floods : ANFAS Project », in : *ITFM Conference*, Bujing, 2001.
- [43] F.-X. LE DIMET, « Errors and data assimilation », in : *IMS, Statistical Approaches to the Ocean Circulation Inverse Problem*, Florida State University, Tallahassee, 2001.
- [44] F.-X. LE DIMET, « Une introduction à l'assimilation de données », in : *Journées du CNES*, Toulouse, 2001.
- [45] L. MÉMERY, B. FAUGERAS, V. ECHEVIN, « Assimilation of biogeochemical observations in ocean models », in : *GSA-GSL Earth System Processes Meeting*, Edimburgh (Scotland), june 2001.
- [46] P. NGNEPIEBA, F.-X. LE DIMET, « Dérivation automatique et identification : une application en hydrologie », in : *1er Congrès National de Mathématiques Appliquées et Industrielles, SMAI'2001*, Pompadour, 2001.
- [47] J. M. WILLIAMS, L. DEBREU, P. PENVEN, P. MARCHESIELLO, « ROMS Embedded Gridding, Test and Application for the Simulation of the Central Upwelling of the Pacific Coast of the United States », in : *2001 Terrain-Following Coordinates Ocean Model Users Whorshop*, Boulder, août 2001.

## Rapports de recherche et publications internes

- [48] F. ABRAMOVIC, A. ANTONIADIS, B. VIDAKOVIC, T. SAPATINAS, « Testing in functional analysis of variance models », *rapport de recherche*, IMAG-LMC, Novembre 2001.
- [49] A. ANTONIADIS, G. GRÉGOIRE, I. MCKEAGUE, « Bayesian estimation in single-index models », *rapport de recherche*, IMAG-LMC, Juin 2001.
- [50] A. ANTONIADIS, F. SAPATINAS, « Wavelet Methods for Continuous-time Prediction Using Representations of Autoregressive processes in Hilbert spaces », *rapport de recherche n° RR1042-M*, IMAG-LMC, Septembre 2001.

- [51] I. HOTEIT, D. T. PHAM, « An adaptively reduced order extended Kalman filter for data assimilation in the tropical pacific », *rapport de recherche n°4298*, INRIA, octobre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4298.html>.
- [52] I. HOTEIT, D. T. PHAM, « Evolutivity of the reduced state space and data assimilation schemes based on the Kalman filter », *rapport de recherche n°4283*, INRIA, septembre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4283.html>.
- [53] P. NGNEPIEBA, F.-X. LE DIMET, V. SHUTYAEV, « On error sensitivity analysis in variational data assimilation », *rapport de recherche n°RR 4220*, INRIA, juillet 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4220.html>.

## Divers

- [54] K. BOSAK, « Real-time numerical identification of plasma in Tokamak fusion reactor », septembre 2001, Mémoire de magistère.
- [55] L. DEBREU, E. BLAYO, B. BARNIER, « Maillage adaptatif et méthodes de zoom : études complémentaires et transfert de compétence », octobre 2001, Rapport final - Marché EPSHOM.
- [56] J. ETIENNE, « Simulation numérique d'écoulements à surface libre avec tensions capillaires par une méthode Lagrange-Euler arbitraire », 2001, Rapport de DEA de l'université Joseph Fourier, <http://www-lmc.imag.fr/lmc-edp/Pierre.Saramito/Jocelyn-Etienne-dea.ps.gz>.
- [57] C. LAUVERNET, « Adaptation de maillage pour la modélisation numérique des avalanches par des équations moyennés, dans l'épaisseur », 2001, Rapport de DEA de l'université Joseph Fourier, <http://www-lmc.imag.fr/lmc-edp/Pierre.Saramito/Claire-Lauvernet-dea.ps.gz>.
- [58] J.-G. PICCINALI, « Décomposition de domaine et couplage de codes en océanographie », décembre 2001, Mémoire de mastère Météo-France, Toulouse.