

Projet IDOPT

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

Rhône-Alpes

THÈME 4B



*R*apport
d'Activité

2000

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	5
2.0.1	i) l'identification :	5
2.0.2	ii) l'optimisation :	5
3	Fondements scientifiques	5
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	7
3.4	Méthode de décomposition en sous-domaines	7
3.4.1	pour la synthèse modale	8
3.4.2	pour un problème de contrôle optimal	8
3.4.3	Programmation parallèle	9
3.5	Problèmes inverses, ondelettes et méthodes non-paramétriques	9
3.6	Filtrage de Kalman	11
4	Domaines d'applications	13
4.1	Identification et optimisation en physique	13
4.1.1	Physique des plasmas	14
4.1.2	Capillarité et hydrodynamique du mouillage	15
4.1.3	Cristallogenèse	16
4.2	Environnement	16
4.2.1	Océanographie	17
4.2.2	Météorologie	19
4.2.3	Hydrologie	19
5	Logiciels	20
5.1	Maillage adaptatif	20
5.2	Décomposition de domaine	20
6	Résultats nouveaux	21
6.1	Méthode de décomposition en sous-domaines	21
6.1.1	Programmation parallèle	21
6.1.2	Chimie Atmosphérique	21
6.2	Problèmes inverses, ondelettes et méthodes non-paramétriques	21
6.3	Schémas compacts pour les modèles océaniques	23
6.4	Méthodes multi-résolution et couplage de modèles en océanographie	23
6.5	Assimilation de données en océanographie	24
6.6	Modélisation des statistiques d'erreur	26
6.7	Hydrologie	28

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	29
7.1 Actions industrielles	29
8 Actions régionales, nationales et internationales	30
8.1 Actions régionales	30
8.2 Actions nationales	30
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	33
9 Diffusion de résultats	33
9.1 Animation de la Communauté scientifique	33
9.2 Enseignement	34
9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations	34
9.4 Distinctions	34
10 Bibliographie	34

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

Jacques Blum, [professeur, université de Grenoble 1]

Assistante de projet

Corinne Bayeul, [CES, puis vacation]

Personnel CNRS

Isabelle Charpentier, [CR]

Dinh Tuan Pham, [DR]

Personnel institut national polytechnique de Grenoble

Jérôme Monnier, [MC]

Personnel université de Grenoble 1

Anestis Antoniadis, [professeur]

Eric Blayo, [MC]

François-Xavier Le Dimet, [professeur]

Patrick Witomski, [professeur]

Chercheurs post-doctorants

Aïcha Bounaïm, [ATER à Grenoble 2]

Hervé Knochel, [ingénieur ADR sur contrat SHOM]

Fabrice Veersé, [boursier INRIA jusqu'au 30 septembre 2000]

Junqing Yang, [post-doc ANFAS]

Diplôme de Recherche Technologique

Jean-Michel Fabre, [Schneider, soutenue le 29 octobre 2000]

Chercheurs doctorants

Didier Auroux, [Elève 4eme anné ENS Lyon]

Laurent Debreu, [allocataire MESR]

Sophie Durbiano, [allocataire MESR]

Blaise Faugeras, [allocataire MESR]

Sophie Fontaine, [boursière ADEME-ASCOPARG]

Ibrahim Hoteit, [allocataire MESR]

Vincent Janicot, [contrat CIFRE avec la société ANACAD]

Cyril Mazauric, [stagiaire, puis boursier ANFAS]

Véronique Martin, [Doctorant Paris 13]

Pierre Ngnepieba, [boursier CIES]

Ioana Paun, [ATER à Université de Strasbourg]

Patrick Vidard, [boursier CERFACS]

Chercheurs invités

Jaoua Mohamed Boukhari, [professeur, Ecole Nationale d'ingénieur de Tunis]

Victor Shutyaev, [professeur, Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscou (2 mois)]

Tsyroulnikov Mikhail, [Hydrometeorological Research Center of Russia (2 mois)]

Minghui Yu, [professeur, Departement of Water Ressource and River Engineering, Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering (3 mois)]

Collaborateurs extérieurs

Gérard Grégoire, [professeur, université de Grenoble 2]

Jacques Verron, [DR CNRS au LEGI]

Alain Le Breton, [professeur, université de Grenoble 1]

Stagiaires

Stephane Graillat, [élève ingénieur ENSIMAG]

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 :

2.0.1 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.

2.0.2 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].

[Lio68] J. LIONS, *Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles*, Dunod, 1968.

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 domaine ainsi [MS76]: 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 estimer 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 [14] [Cha98]. Ceux qui ont pratiqué l'écriture

-
- [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. Céa (éditeurs), II, Sijthoff and Noordhoff, Alphen aan den Rijn, The Netherlands, 1981.
- [Cha98] I. CHARPENTIER, «The MesODiF package for gradients computations with the atmospheric model

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 [CF98]. 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 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 [DND00].

3.4 Méthode de décomposition en sous-domaines

Participant : Isabelle Charpentier, Aïcha Bounaïm.

La simulation de phénomènes physiques complexes tels que rencontrés en mécanique des

-
- 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>.
- [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.
- [DND00] F.-X. L. DIMET, M. NAVON, D. DAESCU, «Second order information in data assimilation», soumis, 2000.

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 problème impliquent une 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 pour la 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 pour un problème de contrôle optimal

Dans une première approche, on remplace la minimisation de la fonctionnelle coût définie sur le domaine global par des problèmes de minimisation définis sur des sous-domaines et

[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.

prenant en compte les raccordements à l'interface entre les sous-domaines par des méthodes de lagrangien augmenté. D'abord mise en œuvre pour un problème elliptique, cette approche a été étendue aux problèmes de contrôle optimal de systèmes paraboliques d'équations aux dérivées partielles, avec une décomposition en espace du domaine de calcul.

Cette méthode a été comparée à celle consistant à paralléliser la résolution des systèmes d'équations directs et adjoints effectuée à chaque itération de la minimisation. Un préconditionnement par une méthode de Schwarz additive de l'algorithme Bi-CGStab utilisé pour cette résolution a été proposé. Cela a permis d'obtenir de bonnes performances parallèles, supérieures à celles obtenues lors de la résolution des systèmes direct et adjoint par une (MDD) avec recouvrement utilisant la méthode alternée de Schwarz multiplicative.

Les calculs numériques ont été effectués sur la machine parallèle SP1 de l'IMAG en utilisant la librairie de passage de message MPI, et sur le CRAY T3E du CEA de Grenoble.

Ce travail a également fait l'objet de deux communications ^[Bou99a,Bou99b] et d'un papier [21].

3.4.3 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 §6.4).

3.5 Problèmes inverses, ondelettes et méthodes non-paramétriques

Participants : Anestis Antoniadis, Gérard Grégoire, Zouhir Hamrouni, Dinh Tuan

-
- [Bou99a] A. BOUNAÏM, « Algorithmes itératifs de Schwarz et problèmes de contrôle optimal », *in* : 31^{ème} Congrès d'Analyse Numérique, Ax-Les-Thermes, 1999.
- [Bou99b] A. BOUNAÏM, « Utilisation des algorithmes de Schwarz pour la résolution d'un problème de contrôle optimal », *in* : Actes de l'École d'Automne sur le Calcul parallèle et distribué, ParDi '99, p. 77-84, Oujda, Maroc, octobre 1999.
- [Ver97] R. VERFÜRTH, *A Review of a Posteriori Error Estimates and Adaptive Mesh-Refinement Techniques*, Wiley-Teubner, 1997.

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 [AF99]. Les problèmes d'optimisation non-convexe ainsi posés sont résolus par des méthodes d'optimisation stochastique. 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 l'emplacement et les amplitudes 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 minimale [GN00,GN99]. Par ailleurs, pour étudier plus généralement 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

-
- [AFR98] A. ANTONIADIS, J. FERRER, M. ROTH, « Data Compression for Diffraction Patterns », *Acta. Cryst. Series D*, 54, 1998, p. 184–199.
- [Ant99] A. ANTONIADIS, « Wavelet Estimators for change-point regression models », *CRM - AMS Lecture Notes*, 18, 1999, p. 335–346.
- [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.
- [AF99] A. ANTONIADIS, J. FAN, « Regularization of Wavelets Approximations », *rapport de recherche*, IMAG-LMC, septembre 1999.
- [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.

l'estimation du nombre de ruptures et à la qualité de reconstitution du signal.

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 ;
- 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 ^[ABF99].

3.6 Filtrage de Kalman

Participants : Alain Le Breton, Dinh Tuan Pham, Jacques Verron.

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

[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.

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 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⁺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*) [Pha96,Pha97,PVG98], 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]. Un travail de synthèse sur ces différentes méthodes avec des expérimentations sur le modèle simple de Lorenz va être publié [Pha]. 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 [45, 28, 29] et ont fait l'objet d'un article

-
- [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.
- [VGP⁺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.
- [Pha] D. T. PHAM, « Stochastic methods for sequential data assimilation in ».

soumis [HPB00a]. 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. 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 [46, 30, 31], qui font l'objet d'un article [HPB00b]. 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. Les résultats de 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 résultats font partie de la thèse d'Hoteit, dont la soutenance est prévu en janvier 2001.

En dehors 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 [LR99] ou de type fractionnaire [KLR99b,KLR99c,KLR99a]. 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.

4 Domaines d'applications

4.1 Identification et optimisation en physique

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

Résumé : *Les domaines applicatifs sont la physique des plasmas (pour la*

-
- [HPB00a] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM, « A Efficient reduced Kalman filtering and application to altimetric data assimilation in tropical Pacific », soumis, 2000.
 - [HPB00b] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM, « A Semi-evolutive filter with partially local correction basis for data assimilation in oceanography », soumis, 2000.
 - [LR99] A. LE BRETON, M.-C. ROUBAUD, « Asymptotic optimality of approximate filters in stochastic systems with colored noises », *rapport de recherche n° 3801*, INRIA, novembre 1999, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3801.html>.
 - [KLR99b] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON, M.-C. ROUBAUD, « General approach to filtering with fractional Brownian noises - Application to linear systems », soumis, 1999.
 - [KLR99c] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON, M.-C. ROUBAUD, « Parameter estimation and optimal filtering for fractional type stochastic systems », soumis, 1999.
 - [KLR99a] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON, M.-C. ROUBAUD, « An elementary approach to filtering in systems with fractional Brownian observation noise », *in : Proceedings of the 22nd E.M.S. and 7th Vilnius Conference on Probability Theory and Mathematical Statistics*, 1999. À paraître.

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 : Adnene Ben Abdallah, Jacques Blum, 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 poloïdal 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 ^[BB97]. 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 [39].

[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.

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, 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 détermine actuellement les solutions auto-similaires de ce problème.

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. Cette année a été essentiellement consacrée à rechercher et comprendre les modèles physiques pertinents dans le domaine (vaste) de la dynamique du mouillage. Notre objectif est à terme de savoir traiter numériquement l'électro-mouillage avec changement de topologie. Ce problème a été abordé dans la thèse de S. Bouchereau 1997 [Bou97]. Une première étude utilisait des techniques d'optimisation de forme, ce qui a permis de simuler le comportement d'une goutte liquide posée sur un support et soumise à un potentiel électrique, jusqu'à un certain potentiel critique. Expérimentalement et pour des potentiels supérieurs, la goutte cesse de s'étaler et il apparaît des changements de topologie (éjection de gouttelettes). Les techniques de simulation employées ne paraissent alors plus être adéquates et le modèle incomplet. La difficulté majeure provient du fait que, aussi bien des phénomènes microscopiques (forces intermoléculaires) que des phénomènes macroscopiques (capillarité, gravitation) doivent être pris en compte. Au travers de cette application nous regardons les problèmes d'approximation numérique de problèmes à deux échelles. Un papier sur l'analyse mathématique et numérique

[Bou97] S. BOUCHEREAU, *Modélisation et simulation numérique de l'électro-mouillage*, thèse de doctorat, université Joseph Fourier, avril 1997.

d'un modèle (à partir de [Shi93], [Shi94]) prenant en compte les effets Marangoni dus à la variation de tension de surface, est en cours de rédaction. Nous avons également organisé des journées de travail sur ce thème, nous mettant en contact avec des physiciens numériques ou pas (Pr G. Labrosse (LIMSI - Orsay); Pr Th Duffar (ENSIEG - INPG); Pr Eustatopoulos (ENSEEG - INPG); Pr Valade (Specto-physique- UJF)...). Il est clair que si les applications industrielles sont nombreuses et variées (des optiques à focale variable à la soudure en métallurgie), les couplages modèles-méthodes numériques restent à trouver et à mettre au point.

4.1.3 Cristallogenèse

Participants : Patrick Witomski, Jérôme Monnier.

Ce thème est en attente d'un thésard pour poursuivre les travaux de la thèse de S. Despréaux [Des98]. Cette thèse a donné lieu à des publications sur le plan mathématique [DW99] et P. Witomski termine en ce moment un article sur l'existence et l'unicité d'une solution pour l'équation à courbure principale dans des domaines non convexes. La partie simulation numérique a été publiée dans *Journal of Crystal Growth* qui est la référence en la matière [15]; voir aussi [BDWN99]. Un article sur la partie optimisation de forme est en cours de rédaction avec J. Monnier.

Ce travail ouvre de nouvelles voies de recherche dont la plus intéressante est celle qui consiste à considérer des filières 3-D. Ceci pose un problème d'optimisation de forme pour modéliser les procédés de fabrication de monocristaux par utilisation de forces capillaires. On réalise un ménisque liquide qui s'appuie sur une filière (frontière extérieure) et sur le cristal (frontière intérieure) qui se forme à partir d'un germe pré-orienté. Le problème que l'on résout est de déterminer une forme de filière qui assure avec le cristal un contact liquide-solide dans un plan à hauteur constante (l'interface de cristallisation liquide-solide que l'on suppose connue). La thèse de S. Despreaux suppose la filière plane. L'idée est de calculer des filières en forme "d'entonnoir" le liquide s'appuyant sur la surface latérale afin de mieux traiter les formes de cristaux présentant des coins.

4.2 Environnement

Mots clés : assimilation de données, calcul parallèle, commande optimale, décomposition de domaine, filtrage, hydrologie, maillage adaptatif, météorologie,

-
- [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.
- [Des98] S. DESPRÉAUX, *Optimisation de formes en cristallogenèse*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, novembre 1998.
- [DW99] S. DESPRÉAUX, P. WITOMSKI, « Problème de capillarité avec conditions aux limites mixtes », *C. R. A. S* 329, 1999, p. 343–346.
- [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.

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 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 comparer l'efficacité de ces deux approches.*

4.2.1 Océanographie

Participants : Eric Blayo, Jacques Blum, Sylvain Carme, Laurent Debreu, Sophie Durbiano, Blaise Faugeras, Ibrahim Hoteit, Hervé Knochel, François-Xavier Le Dimet, Dinh Tuan Pham, Fabrice Veersé, 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 travaillons sur ce thème, et développons notamment un logiciel permettant d'apporter à tout modèle d'océan aux différences finies (c'est-à-dire la très grande majorité des modèles actuels) la capacité d'adapter dynamiquement son maillage aux caractéristiques de l'écoulement, et également de réaliser des zooms sur des zones pré-définies. 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-adressement de sa structure de données. Ce travail fait l'objet d'un contrat avec le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
- *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) ou 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].

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

-
- [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 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.

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 [44]. 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 [49]. 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'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).

5 Logiciels

5.1 Maillage adaptatif

Participants : Eric Blayo, Laurent Debreu.

Nous avons développé une première version d'un "package" de maillage adaptatif. Cet outil, nommé AGRIF (Adaptive Grid Refinement In Fortran), est destiné aux modèles d'évolution aux différences finies. 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 doit être renseigné par l'utilisateur. Ce package a été développé dans le contexte des modèles océaniques (cf §6.4), et commence à être utilisé dans plusieurs laboratoires et instituts en France et aux USA.

5.2 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 : Aïcha Bounaïm.

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 [18].

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 [23] de la construction de l'adjoint du modèle "3D+chimie" sera résolu.

Les premières études concernent des études de sensibilité [27] réalisées sur le modèle 0D de chimie, gérant les phases acqueuse et gazeuse, développé à l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Pour obtenir les sensibilités, nous avons utilisé les techniques de différentiation automatique (Odysée).

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

[mCP] A. CHARÃO, I. CHARPENTIER, B. PLATEAU, «Programmation par objet et utilisation de processus légers pour les méthodes de décomposition de domaine», À paraître.

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 [10], les méthodes de sélection de modèles [AGG97] et les techniques de lissage à l'aide d'ondelettes.

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 [43] ou encore de type Cauchy [42]. Nous avons également utilisé la transformation continue en ondelettes pour détecter des discontinuités éventuellement présentes dans des signaux observés avec du bruit [Ant98]. Ces méthodes sont actuellement poursuivies pour estimer l'intensité de certains processus ponctuels intervenant lors de la modélisation de données de survie en médecine [9]. 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 développé dans [41] une méthode d'ondelettes pour résoudre le problème de Wicksell. 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 [40]. Dans le cadre de l'étude des problèmes statistiques concernant les fonctions présentant des discontinuités, G. Grégoire et Z. Hamrouni ont obtenu des résultats pour l'estimation du nombre de ruptures dans une fonction de régression qui ont fait l'objet de deux communications [GH98], [GH99b]. Par ailleurs la thèse de Zouhir Hamrouni a été soutenue en 1999 [Ham99], et deux articles ont été soumis [GH99a, GH99c].

-
- [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.
 - [AGG97] A. ANTONIADIS, I. GIJBELS, G. GRÉGOIRE, «Model selection using wavelet decompositions and applications», *Biometrika* 84, 4, 1997, p. 751–763.
 - [Ant98] A. ANTONIADIS, «Change-Point Regression Models», *in: The art of nonparametric statistics*, UCL, Louvain-La-Neuve, Belgique, février 1998.
 - [AFR98] A. ANTONIADIS, J. FERRER, M. ROTH, «Data Compression for Diffraction Patterns», *Acta Cryst. Series D*, 54, 1998, p. 184–199.
 - [GH98] G. GRÉGOIRE, Z. HAMROUNI, «Estimateur du nombre de ruptures dans une fonction de régression», *in: 30iemes Journées de Statistique*, Rennes, 1998.
 - [GH99b] G. GRÉGOIRE, Z. HAMROUNI, «Qualité de reconstitution d'une fonction de régression présentant des ruptures», *in: 31iemes Journées de Statistique*, Grenoble, 1999.
 - [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.
 - [GH99a] G. GRÉGOIRE, Z. HAMROUNI, «Change Point Estimation by Local Linear Smoothing», soumis, 1999.
 - [GH99c] G. GRÉGOIRE, Z. HAMROUNI, «Two non-parametric tests for change-point problems», soumis, 1999.

Pour l'estimation de la fonction d'intensité d'un processus ponctuel, G. Grégoire en collaboration avec Jocelyn Nembé de l'université de Libreville au Gabon ont poursuivi une étude commencée à l'occasion de la thèse de ce dernier et consacrée à l'utilisation du principe de longueur de description minimale. Ce travail a conduit à une publication^[GN00], et une autre a été soumise^[GN99].

6.3 Schémas compacts pour les modèles océaniques

Participants : Eric Blayo, Christine Kazantsev.

Un travail est en cours en collaboration avec C. Kazantsev (Projet NUMATH) afin de déterminer l'impact que pourrait avoir l'utilisation de schémas de type compact dans les modèles océaniques. Une étude théorique sur les principaux processus d'ajustement océanique (ondes de gravité et ondes de Rossby) a montré clairement la supériorité de tels schémas par rapport aux schémas standard utilisés actuellement dans quasiment tous les modèles [13]. Des tests dans un modèle numérique simplifié ont confirmé ce résultat, les schémas compacts permettant, à résultat égal, de diviser par 2 la résolution du modèle. Ce travail doit maintenant être complété par une étude des propriétés de conservation de ces schémas, ainsi que par des tests dans un modèle complet et réaliste (qui seront menés en collaboration avec des océanographes). Ce travail est réalisé dans le cadre du programme national Mercator.

6.4 Méthodes multi-résolution et couplage de modèles en océanographie

Participants : Eric Blayo, Laurent Debreu, Véronique Martin.

Ce travail, débuté en 1997, a porté sur le développement d'une méthode de raffinement (éventuellement adaptatif) de maillage structuré dans le cadre applicatif des modèles de circulation océanique. Les potentialités de la méthode avaient tout d'abord été mises en évidence dans des configurations académiques^[BD99], puis le passage à des modèles à la physique plus complète (modèle aux équations primitives) a été réalisé. Plusieurs applications à un modèle de l'océan Atlantique Nord et Équatorial, et à un modèle du détroit de Gibraltar ont confirmé l'intérêt de ces outils dans un contexte d'applications réelles. Différents aspects ont été plus particulièrement traités, concernant notamment les critères de raffinement, la prise en compte de contraintes physiques (propriétés de conservation, de non-divergence, ...) 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 a été finalisée. Elle est utilisée actuellement à Toulouse et à Brest pour d'autres modèles

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

réalistes d'océan, et à Nantes pour un modèle météorologique. Par ailleurs, L. Debreu a été invité trois mois à UCLA (oct-déc 2000) pour implémenter cette méthode dans le modèle océanique ROMS, et développer de nouvelles fonctionnalités. Enfin, les modèles d'océan utilisant couramment les calculateurs parallèles, nous avons travaillé en collaboration avec l'équipe de Calcul Parallèle du LMC (D. Trystram, G. Mounié) à la mise au point d'un algorithme de répartition dynamique de la charge, pour permettre une mise en œuvre parallèle efficace de ce maillage adaptatif [12],^[Mou00]. Ce travail va maintenant être étendu à la problématique du couplage et de l'emboîtement de modèles océaniques distincts (pour réaliser par exemple un couplage modèle côtier/ modèle hauturier). Une collaboration vient de débiter sur ce thème avec B. Barnier (LEGI, Grenoble), L. Halpern et C. Japhet (Univ. Paris 13), et une thèse (V. Martin) a été initiée.

6.5 Assimilation de données en océanographie

Participants : Eric Blayo, Jacques Blum, Sophie Durbiano, Blaise Faugeras, Ibrahim Hoteit, François-Xavier Le Dimet, Dinh Tuan Pham, Fabrice Veersé, 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 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 menée afin de comparer les possibilités offertes par différentes familles de vecteurs (singuliers, Lyapunov, "breeding 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 plus, 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 décomposer cette variable en une partie stationnaire (le biais systématique) et une partie fluctuante, que les "breeding modes" semblent représenter de façon satisfaisante. L'assimilation de données permet alors d'une part de mieux représenter la dynamique réelle, et d'autre part l'utilisation du biais identifié permet d'améliorer les prévisions.

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 biolo-

[Mou00] G. MOUNIÉ, *Ordonnancement efficace d'applications parallèles : les tâches malléables monotones*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, juin 2000.

giques (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.

Techniques de filtrage stochastique Une autre approche du problème consiste à utiliser les méthodes de type filtrage. Comme indiqué au §3.6, un nouveau filtre (SEEK) a été développé dans le but de réduire les coûts de calcul très importants associés aux filtres classiques de type Kalman. Dans ce cadre, S. Carme a soutenu une thèse de doctorat sur l'implantation du filtre SEEK dans un modèle QG en Atlantique Nord^[Car99]. Parallèlement, I. Hoteit prépare une autre thèse dont le but est d'implanter ce filtre dans des modèles aux équations primitives, à la physique plus complète. De plus, nous avons réalisé sa mise en œuvre et étudié sa performance dans un cadre réaliste de l'océan Pacifique tropical^[PVG98,VGP⁺97]. Pour diminuer encore le coût de calcul de notre filtre, qui reste très important pour une application pratique dans une configuration réaliste, nous avons exploré plusieurs pistes, décrites précédemment au §3.6. 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. Un 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 au dynamique du système. Enfin, nous introduisons encore d'autres améliorations, notamment l'utilisation d'un facteur d'oubli adaptatif, dont la valeur varie en fonction de l'erreur de prévision et/ou l'énergie cinétique de l'océan. Tous ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse d'I. Hoteit et ont donné des résultats très encourageants. Ces résultats font également l'objet de deux rapports de recherche [45, 46], de deux articles soumis^[HPB00b] et plusieurs conférences [28, 30, 31, 29]. Par ailleurs, nous essayons de renforcer la stabilité du filtre et sa robustesse vis-à-vis de la non-linéarité. Une variante du filtre SEEK

-
- [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.
- [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⁺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.
- [HPB00b] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM, «A Semi-evolutive filter with partially local correction basis for data assimilation in oceanography», soumis, 2000.

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 [Pha96,Pha97,PVG98], 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. 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 [Pha]. Ces méthodes ont été testées dans le cadre du modèle de Lorenz simple, mais leur application dans une configuration réaliste reste encore trop coûteux.

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 [Vee99a]. 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 [48, 47].

6.6 Modélisation des statistiques d'erreur

Participants : Didier Auroux (ENS Lyon), Fabrice Veersé.

L'assimilation variationnelle de données revient essentiellement à minimiser une fonction coût qui est la somme de la distance de la trajectoire du modèle aux observations sur une période temporelle et de la distance à une ébauche (estimation *a priori* de la condition initiale

-
- [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.
- [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>.
- [Pha] D. T. PHAM, «Stochastic methods for sequential data assimilation in».
- [Vee99a] F. VEERSÉ, «4D-Var/SEKS: a consistent variational-filtering data assimilation method», soumis, 1999.

optimale de cette trajectoire) au début de cette période. Ces distances sont pondérées par leur matrice de covariances d'erreur respectives, pour tenir compte des incertitudes sur les observations et l'ébauche. Comme la dimension du vecteur d'état du modèle est habituellement grande en météorologie et en océanographie ($10^5 - 10^9$) et les relations entre les variables du modèle sont complexes, il n'est pas possible, en pratique, de manipuler la matrice de covariances d'erreur de l'ébauche utilisée pour pondérer l'information provenant du modèle ($10^{10} - 10^{18}$ composantes scalaires). C'est pourquoi l'opérateur linéaire correspondant est modélisé par la composition d'opérateurs utilisables avec les calculateurs parallèles actuels. En conséquence les covariances d'erreur spécifiées sont presque toujours climatologiques et ne dépendent pas de la dynamique sous-jacente. Il s'agit là d'un défaut majeur des mises en oeuvre actuelles des méthodes d'assimilation variationnelle.

F. Veersé a proposé une méthode pour spécifier des covariances d'erreur de l'ébauche dynamiques, en utilisant des opérateurs quasi-Newton à mémoire limitée [Vee99d], [Vee99c], [Vee99b]. Pour qu'une telle méthode soit efficace en pratique, il faut que l'approximation à mémoire limitée de la matrice hessienne inverse fournie par le code de minimisation quasi-Newton (M1QN3 de la bibliothèque MODULOPT de l'INRIA) soit de bonne qualité. Ceci a motivé l'étude faite durant son stage de 2^{ème} année par D. Auroux, avec un système simple (équation de Burgers diffusive sur un cercle de latitude) mais proche par certains aspects de modèles météorologiques plus complexes [Aur99]. Cela a conduit à proposer une modification du code de minimisation M1QN3 qui, pour ce problème, améliore grandement la qualité de l'approximation de la matrice hessienne inverse et nécessite 10% d'itérations en moins pour obtenir le minimum à une précision donnée [VAF99]. F. Veersé a prolongé cette étude par de nombreuses expériences numériques en utilisant des collections de problèmes tests pour les codes de minimisation [VA99].

Cette approche pour la modélisation des covariances d'erreur reste néanmoins limitée par l'approximation *en moyenne* de la hessienne inverse fournie par le code de minimisation. Elle a permis cependant de proposer un préconditionnement pour les calculs des erreurs *a posteriori* utilisant les modèles adjoints dits de second ordre (collaboration en cours avec l'Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research), et pour le calcul des directions intervenant dans la prévision d'ensemble (de type Monte Carlo) et le filtre de Kalman simplifié au Centre Européen

-
- [Vee99d] F. VEERSÉ, « Variable-storage quasi-Newton operators for modeling error covariances », *in: Proceedings of the Third World Meteorological Organization Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography*, Québec, 1999. À paraître.
- [Vee99c] F. VEERSÉ, « Variable-storage quasi-Newton operators for forecast/analysis error covariance specification in variational data assimilations », *in: European Geophysical Society General Assembly*, La Haye, 1999.
- [Vee99b] F. VEERSÉ, « Variable-storage quasi-Newton operators as inverse forecast/analysis error covariance matrices in variational data assimilation », *rapport de recherche n° 3685*, INRIA, avril 1999, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3685.html>.
- [Aur99] D. AUROUX, « Étude de la qualité de l'information contenue dans l'approximation de la hessienne inverse de l'algorithme quasi-Newton à mémoire limitée au cours de la minimisation », juillet 1999, Mémoire de stage de 2^{ème} année de l'ENS Lyon.
- [VAF99] F. VEERSÉ, D. AUROUX, M. FISHER, « Limited-memory BFGS diagonal preconditioners for a data assimilation problem in meteorology », À paraître JOURNAL = Optimization and Engineering,.
- [VA99] F. VEERSÉ, D. AUROUX, « Scaling and updating L-BFGS diagonal preconditioners. Part 2: MODULOPT, MINPACK-2 and CUTE experiments », soumis, 1999.

de Prévision Météorologique à Moyen Terme.

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'assimilation 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

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

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).

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Actions industrielles

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 autre contrat concerne SCHNEIDER ELECTRIC et porte sur la mesure du courant électrique à partir de sondes discrètes. Il utilise notre acquis dans le domaine des plasmas et a une forte potentialité industrielle. Une méthode numérique basée sur le contrôle optimal a permis de mettre au point une méthode d'identification en temps réel. Un logiciel a été développé par SIMULOG à partir de FLUX EXPERT, qui permet d'identifier le courant dans des conducteurs à partir des mesures de champ magnétique dans une configuration cylindrique (approximation bi-dimensionnelle). Le contrat s'est poursuivi par le DRT (Diplôme de Recherche Technologique) de Jean-Michel Fabre, dont le rôle a été de dimensionner au mieux l'électronique à mettre en oeuvre afin d'obtenir des résultats exploitables industriellement. Ce dimensionnement concerne plusieurs type de produits du groupe SCHNEIDER ELECTRIC

qui ont été recensés. Les résultats obtenus doivent permettre de déterminer si l'on peut envisager un prototypage de la méthode de commande optimale sur un ou plusieurs cas d'étude à court, moyen ou long terme en fonction des contraintes techniques telles que le nombre et la performance des capteurs.

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 6.4).

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.

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'Educational 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 laboratoires [Mou99,Omo99,Bla99,Cas99,Tam99]. 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 pro-

-
- [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.
 - [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.

fesseur J. Fan (université de Caroline du Nord, Chapel Hill) et le Professeur B. MacGibbon (université du Québec à Montréal).

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 devrait commencer en 2001. Les techniques de type contrôle optimal seront appliquées à l'étude de la croissance des plantes.

8.5 Visites, et invitations de chercheurs

- Junqing YANG (Chine) année 2000
- Minghui YU (Chine) 4 mois
- Victor SHUTAIEV (Russie) 2 mois
- Mikhail TSYROULNIKOV (Russie) 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.
- A. Antoniadis a présidé le comité d'organisation des 31^{èmes} Journées de Statistiques, qui ont eu lieu à Grenoble en mai 1999.
- 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 très 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 :

- Commande optimale (24 heures, J. Blum) ;
- Modélisation numérique et EDP. Applications micro-électronique et hydrodynamique. (24 heures, J. Monnier) ;
- Modélisation et assimilation de données en océanographie (24 heures, E. Blayo et F.-X. Le Dimet) ;
- Ondelettes et applications (12 heures, A. Antoniadis) ;
- Méthodes d'estimation fonctionnelle (12 heures, G. Grégoire) ;
- DEA de Mathématiques appliquées de l'UJF (F.-X. Le Dimet) ;
- Ecoles d'été: Institut Sino français de Mathématiques Appliquées: Hangzhou (Chine), Août 2000 : cours assimilation de données (F.-X. Le Dimet) ;
- CARI (Antananarivo, Octobre 2000) : contrôle et croissance de plantes (F.-X. Le Dimet).

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.

9.4 Distinctions

Le chercheur Anestis Antoniadis a été nommé "a fellow" de l'American Statistical Association lors d'un colloque à Indianapolis du 13 au 17 août 2000.

Ce titre récompense depuis plus de 75 ans les meilleurs statisticiens internationaux. A. Antoniadis a été reconnu entre autre, pour ses travaux dans le domaine des statistiques appliquées à la météorologie et à la cristallographie.

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] L. DEBREU, *Raffinement adaptatif de maillage et méthodes de zoom - application aux modèles d'océan*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, janvier 2000.

Articles et chapitres de livre

- [9] 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.
- [10] A. ANTONIADIS, F. LEBLANC, « Wavelet Regression for Binary Response », *Statistics*, 35, 2000, p. 183–213.
- [11] A. ANTONIADIS, « Wavelets in Statistics: A Review », *Journal of the Italian Statistical Society* 6, 2, 1999, p. 97–144.
- [12] E. BLAYO, L. DEBREU, D. T. G. MOUNIÉ, « Dynamic load balancing for ocean circulation model with adaptive meshing », *Engineering Simulation 22*, 2000, p. 8–24.
- [13] E. BLAYO, « Compact finite difference for ocean models. Part 1: ocean waves », *J. Comp. Phys.* 164, 2000, p. 241–257.
- [14] I. CHARPENTIER, M. GHEMIRE, « Efficient adjoint derivatives: Application to the atmospheric model MESO-NH », *Optimization Methods and Software 13*, 1, 2000, p. 35–63.
- [15] S. DESPRÉAUX, T. DUFFAR, P. WITOMSKI, « Die optimal shape design for crystal growth process », *Journal of crystal growth 209*, 2000, p. 983–993.
- [16] F.-X. L. DIMET, V. SHUTAYEV, « Newton Methods in Data assimilation », *Russ. J. Anal. Math. Modeling 15*, 5, 2000, p. 419–434.
- [17] G. GRÉGOIRE, J. NEMBÉ, « Convergence rates for the minimum complexity estimator of counting process intensities », *Journal of Nonparametric Statistics 12*, 2000, p. 611–643.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [18] 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.
- [19] E. BLAYO, L. DEBREU, B. BARNIER, «multiresolution approach and model nesting in ocean modelling», *in: International workshop on the technical aspects of future sea-ice-ocean-atmosphere-biosphere coupling*, Toulouse, 2000.
- [20] E. BLAYO, C. KAZANTSEV, «compact schemes for ocean modelling», *in: Ocean Sciences Meeting, congrès de l'American Geophysical Union*, San Antonio, 2000.
- [21] A. BOUNAIM, «On the use of iterative Schwarz algorithms in the solution of an optimal control problem», *in: the 13th International Conference on Domain Decomposition Methods*, Lyon, 2000.
- [22] I. CHARPENTIER, N. JAKSE, F. VEERSÉ, «Second order exact derivatives to perform optimization on self-consistent integral equations problems», *in: AD2000*, Nice, 2000.
- [23] I. CHARPENTIER, «Adjoining 3D atmospheric chemistry models», *in: ECMI*, Palerme, 2000.
- [24] L. DEBREU, E. BLAYO, H. KNOCHÉL, «Adaptive multiresolution experiments in a primitive equation model of the north Atlantic», *in: European Geophysical Society general assembly*, Nice, 2000.
- [25] L. DEBREU, E. BLAYO, H. KNOCHÉL, «an adaptive multiresolution approach for finite-difference ocean models», *in: Ocean Sciences Meeting, congrès de l'American Geophysical Union*, San Antonio, 2000.
- [26] L. DEBREU, E. BLAYO, «Maillage adaptatif et méthodes de zoom pour la modélisation des circulations océaniques», *in: Congrès national d'Analyse Numérique*, le Vieux Boucau, 2000.
- [27] R. DJOUAD, B. SPORTISSE, I. C. N. AUDIFFREN, «Modeling aqueous phase chemistry: numerical integration and sensitivity analysis», *in: GLOREAM*, Cottbus, 2000.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] C. KAZANTSEV, E. BLAYO, «compact finite difference for ocean modelling», *in: European Geophysical Society general assembly*, Nice, 2000.
- [33] F.-X. LE DIMET, «Control of drag by blowing and sucking», *in: Asian Conference on fluid dynammics*, Shenzen , Chine, 1999.

- [34] F.-X. LE DIMET, «Differentiability properties in Data assimilation», *in: Automatic Differentiation*, Nice, 2000.
- [35] F.-X. LE DIMET, «Identification for underground water», *in: CARI 2000*, Madagascar, 2000.
- [36] F.-X. LE DIMET, «Identification problems for unsaturated flows», *in: Ecosystem and flood*, Hanoi, 2000.
- [37] F.-X. LE DIMET, «Models and data for the study of the water cycle», *in: ISFMA Conference*, Hangzhou, Chine, 2000.
- [38] F.-X. LE DIMET, «Second ordre methods in D.A.», *in: Conference on Numerical Mathematics*, Moscow, 2000.

Rapports de recherche et publications internes

- [39] A. B. ABDALLAH, « Identification de la Densité de courant dans un Tokamak », *rapport de recherche*, IMAG-LMC, Janvier 2000.
- [40] U. AMATO, A. ANTONIADIS, G. GRÉGOIRE, «Independent Component Discriminant Analysis», *rapport de recherche*, IMAG-LMC, Sept. 2000.
- [41] A. ANTONIADIS, I. GIJBELS, J. FAN, «A Wavelet Method for Unfolding Sphere Size Distributions», *rapport de recherche n° DP. 0017*, Institut de Statistique, Mai 2000.
- [42] A. ANTONIADIS, D. LEOPORINI, J.-C. PESQUET, «Wavelet Thresholding for Some Classes of non Gaussian Noise», *rapport de recherche*, IMAG-LMC, Octobre 2000.
- [43] A. ANTONIADIS, T. SAPATINAS, «Wavelet Shrinkage for Natural Exponential Families with Quadratic Variance Functions», *rapport de recherche*, Institute of Statistics, Univ. Kent., Janvier 2000.
- [44] F.-X. L. DIMET, V. SHUTAYEV, J. WANG, «The problem of data assimilation for soil water mouvement», *rapport de recherche*, INRIA, decembre 2000.
- [45] 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° 3397*, INRIA, mai 2000.
- [46] 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>.
- [47] 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>.
- [48] 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>.
- [49] L. WHITE, B. VIEUX, F.-X. L. DIMET, « Estimation of optimal paramaters for a surface hydrology model », *rapport de recherche*, University of Oklahoma, mai 2000.

Divers

- [50] D. AUROUX, « Une nouvelle méthode d'assimilation de données en océanographie », septembre 2000, Mémoire de stage de DEA, Grenoble.
- [51] I. CHARPENTIER, « Décomposition de domaine et contrôle optimal pour des problèmes en physique et en environnement », 23 décembre 2000, Habilitation à diriger des recherches de l'Université Joseph Fourier.
- [52] J.-M. FABRE, « Etude numérique d'une méthode inverse de mesure de courant à partir de mesures ponctuelles de champ magnétique », octobre 2000, Diplôme de Recherche Technologique de l'Université Joseph Fourier.