

*Projet IDOPT**Identification et optimisation de systèmes
en physique et en environnement**Rhône-Alpes*

THÈME 4B



*R*apport
d'Activité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
2. Présentation et objectifs généraux	2
2.1.1. i) l'identification :	2
2.1.2. ii) l'optimisation :	2
3. Fondements scientifiques	2
3.1. Commande optimale et optimisation de forme	2
3.1.1. Commande optimale	2
3.1.2. Optimisation de forme	2
3.2. Dérivation automatique d'un code adjoint	3
3.3. Etude de sensibilité et méthode au second ordre	3
3.4. Méthode de décomposition en sous-domaines	4
3.4.1. Programmation parallèle.	4
3.5. Filtrage de Kalman	4
4. Domaines d'application	5
4.1. Identification et optimisation en physique	5
4.1.1. Physique des plasmas	5
4.1.1.1. Problèmes d'identification en physique des plasmas.	5
4.1.2. Capillarité et hydrodynamique du mouillage	6
4.1.3. Optimisation de forme dans des écoulements couplés avec radiosité	6
4.2. Environnement	7
4.2.1. Océanographie	7
4.2.2. Météorologie	9
4.2.3. Hydrologie	9
5. Logiciels	10
5.1. Maillage adaptatif	10
5.2. Identification en temps réel en physique des plasmas	10
5.3. Décomposition de domaine	10
6. Résultats nouveaux	10
6.1. Méthode de décomposition en sous-domaines	10
6.2. Dynamique du contact liquide-solide	11
6.3. Méthodes multi-résolution et couplage de modèles en océanographie	11
6.4. Théorie de l'assimilation de données	12
6.5. Assimilation de données en océanographie	12
6.6. Modélisation et Assimilation de données pour les inondations.	12
6.7. Données et modèles pour l'agronomie	13
6.8. Schémas d'ordre élevé pour le modèle shallow-water.	13
6.9. Avalanches et coulées de boue	14
6.10. Hydrologie	14
6.10.1. Problèmes d'identification.	14
6.10.2. Problème de sédimentation.	14
7. Contrats industriels	15
7.1. Contrats nationaux	15
7.2. Contrats internationaux	16
8. Actions régionales, nationales et internationales	16
8.1. Actions régionales	16
8.2. Actions nationales	16
8.3. Actions européennes	17

8.3.1.	Europe de l'ouest	17
8.4.	Actions internationales	17
8.4.1.	Afrique	17
8.4.2.	Amérique du Nord	17
8.4.3.	Chine	18
8.4.4.	Russie	18
8.5.	Visites, et invitations de chercheurs	19
9.	Diffusion des résultats	19
9.1.	Animation de la Communauté scientifique	19
9.2.	Enseignement	19
9.3.	Participation à des colloques, séminaires, invitations	20
10.	Bibliographie	20

1. Composition de l'équipe

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.

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

Responsable scientifique

François-Xavier Le Dimet [Professeur UJF, délégation de l'université Grenoble 1]

Assistantes de projet

Corinne Bayeuil [CES, puis vacation]

Hélène Baum

Personnel INRIA

Laurent Debreu [CR]

Evgueni Kasantzev [CR]

Christine Kazantsev [CR en détachement à l'INRIA]

Christophe Vouland [Ingénieur - Associé]

Personnel CNRS

Isabelle Charpentier [CR]

Dinh Tuan Pham [DR]

Pierre Saramito [CR]

Personnel institut national polytechnique de Grenoble

Jérôme Monnier [MC]

Personnel université de Grenoble 1

Anestis Antoniadis [professeur]

Eric Blayo [MC]

Patrick Witomski [professeur]

Personnel université de Nice

Jacques Blum [professeur]

Chercheur post-doctorant

Veronika Fedorenko [post-doc SHOM]

Ingénieur expert

William Castaings [contrat européen]

Chercheurs doctorants

Didier Auroux [allocataire moniteur]

Jocelyn Etienne [allocataire MESR]

Blaise Faugeras [allocataire MESR]

Sophie Fontaine [boursière ADEME-ASCOPARG]

Vincent Janicot [contrat CIFRE avec la société ANACAD]

Claire Lauvernet [Bourse CNS-INRA]

Wu Lin [boursier Ambassade de France - Chine]

Cyril Mazauric [stagiaire, puis boursier ANFAS]

Véronique Martin [Doctorante Paris 13]

Maëlle Nodet [Doctorante Univ. Nice]

Denis Quelo [Doctorant ENPC]

Céline Robert [Doctorante UJF, bourse du CNES]

Chercheurs invités

Marina Kleptsyna [Chercheur, Institut des Problèmes de Transmission de l'Information, Russian Academy of Sciences]

Patrick Marchesiello [Chercheur, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California at Los Angeles]

Mu Mu [Professeur, Académie de Sciences de Chine]

Luther White [Professeur, Univ. of Oklahoma]

Collaborateurs extérieurs

Gérard Grégoire [professeur, université de Grenoble 2]

Jacques Verron [DR CNRS au LEGI]

Alain Le Breton [professeur, université de Grenoble 1]

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 :

2.1.1. 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.

2.1.2. 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.

3.1.1. 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 [66].

3.1.2. 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 : [73][56], ...). 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 [73] : 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

Participant : Isabelle Charpentier.

Les techniques d'assimilation de données fondées sur le contrôle optimal utilisent l'adjoint du modèle pour calculer le gradient de l'écart entre les solutions du modèle et les observations. Ce gradient permet de mettre en œuvre des algorithmes d'optimisation menant à l'estimation de l'état optimal par rapport aux observations. Écrire un code adjoint est un projet réalisable soit en composant à la main les instructions adjointes une à une, soit en générant ce code grâce à un outil de différentiation automatique [54] [52]. Ceux qui ont pratiqué l'écriture manuelle de codes adjoints connaissent parfaitement les méthodes à appliquer, mais savent également que cette tâche, fastidieuse et rébarbative, est source d'importantes erreurs. L'alternative offerte par les outils de différentiation est appréciable mais souvent mésestimée par les constructeurs/utilisateurs de code adjoints. Il a semblé intéressant à I. Charpentier de contribuer à un meilleur dialogue entre concepteurs d'outils de différentiation automatique et utilisateurs de codes adjoints [53]. 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. [94][91][96][97]. Ces travaux font l'objet d'une collaboration avec Florida State University pour la météorologie [98]. Une application de cette technique a été réalisée avec le modèle d'écoulement en zone non-saturée pour les études de propagation d'erreurs [74][99].

3.4. Méthode de décomposition en sous-domaines

Participant : Isabelle Charpentier.

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

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

L'emploi de méthodes de décomposition de domaine est désormais classique, lorsque la géométrie du domaine de calcul est complexe ou que les équations du 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. 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 [87] 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 §6.1).

3.5. Filtrage de Kalman

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

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

deuxième difficulté est la très grande dimension de l'état du système. L'application du filtre conduirait à des calculs prohibitifs. De plus, cette grande taille pose le problème de la spécification adéquate des statistiques des erreurs.

Notre objectif dans le cadre de ce projet consiste à mener une étude approfondie des possibilités de l'approche par filtrage et à terme d'appliquer la méthode sur des données réelles. À cette fin, nous avons proposé un filtre de type Kalman étendu basé sur l'utilisation d'une matrice de covariance des erreurs singulière et de rang faible. Ce filtre opère selon le principe de ne pas faire de corrections dans les directions d'atténuation naturelle des erreurs. Les corrections sont effectuées uniquement dans des directions appartenant à un sous-espace vectoriel. Celui-ci est construit au départ par la méthode des fonctions orthogonales empiriques (EOF), mais évolue par la suite selon le modèle. Ainsi, nous l'appelons (*Singular Evolutive Extended Kalman*) [80][81]. Il a été d'abord testé dans une configuration réduite basée sur le modèle océanique quasi-géostrophique, qui donne des résultats très satisfaisants [80][81]. 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 [88][79]. Nous travaillons actuellement à l'amélioration du filtre, d'une part pour renforcer sa robustesse vis-à-vis de la non-linéarité [78] 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*) [76][77][79], 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 [78]. Ces résultats sont décrits dans la partie « Techniques de filtrage stochastique » de la section « Résultats nouveaux/Assimilation de données en océanographie » (voir les détails dans cette section et les références aux publications correspondantes).

En incidence des activités centrées sur les méthodes stochastiques pour l'assimilation de données, des travaux de nature plus théorique ont été poursuivis dans le domaine du filtrage, du contrôle et de l'identification pour des systèmes stochastiques avec bruits de type fractionnaire [6], [41], [40], [65], [64]. Ces derniers offrent 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'application

4.1. Identification et optimisation en physique

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

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

4.1.1. Physique des plasmas

Participants : Jacques Blum, Isabelle Charpentier.

4.1.1.1. 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 [47]. 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 [17][19][16].

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 de la dynamique du contact liquide-solide. Les applications industrielles sont nombreuses et variées, citons l'étalement de peintures et insecticides, l'optique à focale variable par électro-mouillage, le tirage de films photographiques, la soudure en métallurgie.

Deux études distinctes sont actuellement menées.

Une première sur l'élaboration d'un modèle et d'une méthode numérique de simulation de la dynamique du contact et de l'angle de contact liquide-solide. Cette étude est basée sur les équations établies par Y. D. Shikhmurzaev ([85], [43]) et qui prennent en compte les effets Marangoni dus à une variation de tension de surface. Nous avons écrit un modèle couplant la dynamique du point triple et de l'angle de contact (modèle "méso"), et le mouvement du fluide avec surface libre et tension superficielle (modèle "macro"). Les simulations numériques sont établies sur le cas test du plongement d'une plaque dans un bain liquide.

Le modèle obtenu apporte un élément de réponse significatif au problème classique de la dynamique de la ligne de contact.

Une deuxième étude traite d'un procédé d'étalement d'une goutte liquide sur un substrat à l'aide d'un champ électrique. Ce procédé est à la base du fonctionnement de lentilles adaptatives. De telles expérimentations sont menées au laboratoire de spectrométrie physique de Grenoble avec qui nous sommes en contact et aussi dans la toute récente startup Varioptic.

Notre objectif est de développer un modèle numérique qui prend en compte aussi bien les phénomènes microscopiques (forces inter-moléculaires dues au champ électrique) que les phénomènes mésoscopiques et macroscopiques (capillarité/gravitation) et pour finalement aboutir à un logiciel de simulation numérique. Le modèle est formulé comme un problème d'optimisation de forme où l'on cherche la forme de la goutte comme étant la forme minimisant l'énergie totale de la goutte.

4.1.3. Optimisation de forme dans des écoulements couplés avec radiativité

Participant : Jérôme Monnier.

Nous étudions la formulation mathématique et la résolution éléments finis de problèmes de sensibilité de forme et d'optimisation de forme dans des écoulements visqueux avec transferts thermiques. L'originalité de l'étude réside principalement dans le couplage et la prise en compte des échanges radiatifs avec réflexions multiples dans une cavité-rayonnement de corps gris modélisé par l'équation de radiativité. Citons comme exemple d'applications industrielles le procédé Bridgman de tirage de cristaux, l'écoulement sous capot moteur ou encore tout autre écoulement de convection forcée avec des parois de température élevées (radiativité).

Le modèle direct est constitué des équations de Navier-Stokes incompressible stationnaire couplées avec l'équation de convection-diffusion elle-même couplée avec l'équation de radiativité (équation intégrale). Les conditions aux limites sont du type non local et non linéaire. Le problème d'optimisation consiste à minimiser la température sur un bout de la frontière par rapport à la forme de cette même frontière (des contraintes sur la forme et les variables d'état peuvent être imposées). Nous résolvons le problème de contrôle par la forme avec la méthode classique d'état adjoint et l'appel d'un algorithme d'optimisation de type gradient (BFGS). Les analyses mathématique et numérique (schémas éléments finis) du modèle complet sont à présent achevées, [69]. La différentiabilité de la solution par rapport au domaine est démontrée et le gradient de forme est calculé, [70]. A noter que le calcul des dérivées de forme par la méthode de transport ne nécessite pas la dérivation des facteurs de forme. Tout le processus d'optimisation ainsi que son implémentation sont détaillés, [55].

4.2. Environnement

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

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 construire de nouvelles méthodes combinant les points forts de chacune de ces deux approches.

4.2.1. Océanographie

Participants : Didier Auroux, Eric Blayo, Jacques Blum, Laurent Debreu, Blaise Faugeras, Veronika Fedorenko, Christine Kazantsev, Evgueni Kazantsev, François-Xavier Le Dimet, Dinh Tuan Pham, Céline Robert, Jacques Verron, Christophe Vouland.

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 en développant des outils de raffinement de maillage, et en les intégrant dans un logiciel (AGRIF) permettant d'apporter à tout modèle d'océan (et plus généralement à tout modèle aux différences finies) la capacité d'adapter dynamiquement son maillage aux caractéristiques de l'écoulement, et également de réaliser des zooms sur des zones pré-définies (cf 5.1). Ceci est réalisé au niveau numérique par des schémas localement multigrilles, et au niveau informatique sans modifications du modèle lui-même, mais simplement par un ré-adressage de sa structure de données. L'utilisation de ce logiciel nous a permis d'effectuer des expériences dans plusieurs modèles réalistes d'océan, en coopération avec le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, l'IFREMER, le LEGI (Grenoble), et l'Université de Californie à Los Angeles.
- Schémas numériques d'ordres élevés* : Dans leur grande majorité, les codes océanographiques utilisent des schémas aux différences finies centrées d'ordre 2. Ces schémas sont simples à mettre en oeuvre et d'exécution rapide. Cependant, il existe des schémas d'ordre plus élevé dont l'utilisation pourra peut-être permettre un gain appréciable en coût et/ou en précision. De tels schémas sont toutefois plus difficiles à mettre en oeuvre, et la complexité ainsi que les fortes non-linéarités de la physique océanique ne garantissent pas a priori leur efficacité. Des études spécifiques sont donc absolument nécessaires.

Des schémas d'ordre élevé (schémas compacts) ont déjà été testés dans des cas « académiques » pour l'équation de transport, l'équation stationnaire de vortacité et l'équation de Navier-Stokes incompressible stationnaire où ils se montrent plus efficaces pour obtenir une précision donnée. Ils sont d'ailleurs déjà activement utilisés dans certains modèles atmosphériques sur la sphère. Leur implémentation pour les modèles océaniques pose cependant différents problèmes, dont notamment ceux dus aux conditions aux bords dans des domaines non réguliers sur grilles décalées.

On peut noter que diminuer le nombre de points de maillage tout en conservant la même précision est particulièrement nécessaire pour un certain nombre d'études approfondies qui requièrent l'optimisation et la minimisation de fonctionnelles, telles que l'assimilation de données, les analyses de sensibilité ou encore les études climatiques. Leur coût est en effet supérieur d'un à deux ordres de grandeur au coût d'intégration du modèle lui-même.
- Assimilation de données dans les modèles d'océan* : Le problème se pose pour l'océan dans les mêmes termes que pour l'atmosphère : on cherche à réaliser des simulations numériques en contraignant les solutions du modèle avec des observations afin de répondre à des objectifs de prévision en un sens déterministe ou probabiliste. Les deux approches classiques de ce problème sont le filtrage stochastique (filtre de Kalman) et l'assimilation variationnelle (contrôle optimal). Les difficultés principales rencontrées dans leurs applications en océanographie sont au nombre de trois :

- la dimension des problèmes est telle (variable d'état de dimension 10^6 à 10^7 typiquement) qu'elle interdit l'utilisation directe des méthodes standards pour des problèmes réels (coût du modèle multiplié par plusieurs centaines).
- les non-linéarités des équations sont fortes. L'optimalité de ces méthodes n'est donc plus garantie, et l'approximation du modèle linéaire tangent est même parfois problématique. L'application du filtre de Kalman étendu, qui est basé sur cette approximation, peut alors conduire à des instabilités voire une divergence. L'existence probable de multiples contrôles optimaux locaux pour l'assimilation variationnelle est une difficulté tout aussi importante.
- les caractéristiques des erreurs (des observations et des modèles) sont souvent mal connues.

Dans ce cadre, nous travaillons à la mise au point de méthodes d'assimilation applicables en pratique, et prenant en compte ces spécificités. Les deux approches stochastiques et variationnelles sont étudiées, et font l'objet d'applications à des modèles variés, allant de configurations très idéalisées à des configurations réalistes. Ces travaux sont menés en collaboration avec l'équipe d'océanographie du Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels [67][48][45], [50], [57].

4.2.2. *Météorologie*

Participant : François-Xavier Le Dimet.

La prévision météorologique nécessite la reconstitution, aussi précise que possible, de l'état de l'atmosphère à un instant donné [95]. 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*

Participant : François-Xavier Le Dimet, Cyril Mazauric.

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 [92]. L'étape ultime étant la prévision, le recours à l'assimilation de données est indispensable. Fondamentalement, les lois régissant les écoulements de surface ou souterrains sont les équations de la dynamique des fluides, des techniques de type contrôle optimal seront utilisées comme en météorologie et en océanographie. Des difficultés supplémentaires proviennent de l'influence de la topographie, de la nature des sols, de la végétation et à un autre niveau du manque de données [100]. 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 [89]. 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). La modélisation numérique des inondations fait partie du projet européen ANFAS (voir rubrique 7.2).

5. Logiciels

5.1. Maillage adaptatif

Participants : Eric Blayo, Laurent Debreu, Christophe Vouland.

Le logiciel AGRIF (Adaptive Grid Refinement In Fortran) [39] est développé au sein du projet IDOPT. Celui-ci 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 du modèle doit être renseigné par l'utilisateur. Ce logiciel est d'ores et déjà utilisé dans plusieurs modèles océaniques (cf §6.3) en France et à l'étranger. Nous travaillons actuellement sur la parallélisation des échanges inter-grilles et une première version officielle du logiciel commencera à être diffusée au début de l'année 2003.

5.2. Identification en temps réel en physique des plasmas

Participants : Jacques Blum, Isabelle Charpentier.

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

Il s'agit d'identifier en temps réel la densité de courant du plasma à partir d'informations surabondantes comme les mesures magnétiques, les mesures interférométriques et polarimétriques, l'effet Stark. Le logiciel est écrit en C++, la résolution de l'équation d'équilibre en éléments finis, les non-linéarités par des itérations de point fixe et l'écart aux mesures expérimentales par moindres carrés [49], [19].

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

5.3. Décomposition de domaine

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

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

6. Résultats nouveaux

6.1. Méthode de décomposition en sous-domaines

Participant : Isabelle Charpentier.

L'étude 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, constituait 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 des conférences sur les méthodes de décomposition de domaine [42] et [22].

6.2. Dynamique du contact liquide-solide

Participants : Jérôme Monnier, Patrick Witomski.

Concernant l'étude de la dynamique du contact liquide-solide, nous travaillons à partir des équations établies par Y. D. Shikhmurzaev ([85], [43]) Nous avons alors écrit un nouveau modèle couplant la dynamique du point triple et de l'angle de contact (modèle "méso"), et le mouvement du fluide avec surface libre et tension superficielle (modèle "macro"). Nous avons développé l'analyse mathématique du modèle et mis au point un algorithme de résolution par éléments finis. Des résultats numériques 2D ont été obtenus sur le cas test classique du plongement d'une plaque dans un bain liquide. Nous avons pu visualiser la dynamique de l'angle, la dynamique du point de contact et aussi l'écoulement très localisé autour de ce point (mouvement de caterpillar, [59]). Ces travaux sont rédigés dans un premier article [71], à soumettre. Un deuxième article traitant plus particulièrement de l'algorithmique de couplage méso-macro est en cours de rédaction.

Un élève ingénieur Ensimag-DEA continuera à développer en 2003 dans ce cadre là.

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

Participants : Eric Blayo, Laurent Debreu, Veronika Fedorenko, Véronique Martin, Christophe Vouland.

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

Nous avons dans un premier temps travaillé sur le développement d'une méthode de raffinement (éventuellement adaptatif) de maillage. Les potentialités de la méthode ont été mises en évidence dans des configurations académiques [46], puis sur plusieurs modèles réalistes aux équations primitives : modèle de circulation générale OPA (LODYC, Paris 6), modèle régional ROMS (UCLA), modèle côtier MARS (IFREMER et SHOM). Différents aspects ont été plus particulièrement traités, concernant notamment les critères de raffinement, la prise en compte de contraintes physiques lors des phases d'interaction entre grilles, et les propriétés théoriques de stabilité et de convergence de la méthode. Ces travaux sont accompagnés par le développement d'un logiciel Fortran 90 intégrant ces différents outils, et qui apporte à un modèle d'océan aux différences finies la capacité d'adapter son maillage, sans réécriture du modèle. Une première version de ce logiciel est utilisée actuellement dans plusieurs laboratoires, et une seconde version plus complète sera bientôt disponible.

Nous étendons par ailleurs ce travail à la problématique du couplage et de l'emboîtement de modèles océaniques distincts (pour réaliser par exemple un couplage modèle côtier/modèle hauturier). On se situe alors dans le cadre formel des méthodes de décomposition de domaine, dans lequel nous cherchons à développer des conditions d'interface permettant une amélioration de la physique du couplage pour un coût numérique abordable. Pour ce faire, nous travaillons suivant deux directions :

- d'une part d'un point de vue assez théorique, sur des systèmes d'équations simplifiés, en collaboration avec des mathématiciens du LAGA-Paris 13 (L. Halpern, C. Japhet, V. Martin). Des conditions d'interface absorbantes exactes et approchées ont été calculées et testées avec succès pour les équations de traceurs [68], et un travail similaire est en cours sur les équations shallow-water.

- nous mettons en place d'autre part en collaboration avec des chercheurs océanographes du LEGI à Grenoble (B. Barnier, S. Cailleau) un cadre d'expérimentation réaliste (couplage d'un modèle du Golfe de Gascogne avec un modèle de l'Atlantique Nord) sur lequel seront réalisés nos tests numériques. Les configurations des deux modèles ont été réalisées, ainsi qu'une première version d'un coupleur basé sur MPI-2. Les premières simulations numériques sont en cours.

Ce travail a reçu le soutien du SHOM et du programme Mercator.

6.4. Théorie de l'assimilation de données

Participant : François-Xavier Le Dimet.

Pour la prévision de l'évolution des fluides géophysiques il est nécessaire d'utiliser toute l'information disponible : données, modèles, statistique et de considérer le système d'optimalité qui en résulte comme un véritable modèle généralisé. Plusieurs études ont été menées sur ce thème ; un résultat important et qui ouvre un champ d'investigation immense a été de montrer qu'en améliorant un modèle sans changer les données d'observation, on peut dégrader la prévision. Quels sont les critères d'optimalité pour un modèle connaissant les données fixées ? Ce travail est réalisé dans le cadre de l'équipe associée SEMINOLE (IDOPT-FSU)

6.5. Assimilation de données en océanographie

Participants : Didier Auroux, Eric Blayo, Jacques Blum, Blaise Faugeras, François-Xavier Le Dimet, Dinh Tuan Pham, Céline Robert, Jacques Verron.

Techniques déterministes de contrôle optimal De nombreux travaux avaient été menés ces dernières années sur les problèmes de la réduction d'ordre et du contrôle de l'erreur du modèle dans les méthodes d'assimilation de données variationnelles (thèses de S. Durbiniano et P. Vidard). Ils ont démontré que le principe de la réduction d'ordre, c'est à dire de travailler avec des variables de contrôle appartenant à des espaces bien choisis de dimension faible, peut mener à une amélioration sensible des performances des méthodes d'assimilation. De plus, contrôler simultanément la condition initiale et un terme de biais systématique du modèle permet également un gain intéressant, notamment sur la qualité des prévisions. Les difficultés résiduelles majeures sont d'une part le choix des vecteurs engendrant l'espace réduit lors d'expériences réalistes, et d'autre part l'obtention d'information a priori sur l'erreur-modèle.

Dans la continuité de ces travaux et de ceux menés également sur le filtre SEEK (filtre de Kalman étendu de rang réduit), nous venons de débiter cette année (thèse de C. Robert) en collaboration avec le LEGI un projet visant à réaliser une synthèse de ces divers développements sur un même cas-test réaliste, afin de comparer pour la première fois dans un même cadre les performances des méthodes, et de tenter de les enrichir mutuellement. Le cas-test serait configuré à partir du modèle OPA dans sa configuration de fenêtre Pacifique tropical (OPA-TDH), avec assimilation de mesures TAO, et plus tard d'altimétrie. Les diverses méthodes seront mises en oeuvre et comparées. Puis on pourra aborder de nombreuses pistes de travail concernant ces méthodes, comme par exemple :

- l'utilisation des innovations d'innovation et de résidu d'innovation
- la prise en compte du biais du modèle, y compris pour le filtrage
- la compréhension d'un point de vue mathématique et physique des "broad modes", et leur apport
- l'apport éventuel des méthodes de filtrage sur la spécification de la matrice B de covariance d'erreur d'ébauche du 4D-Var

La thèse de Blaise Faugeras [2], [58] concerne la mise en oeuvre d'une méthode numérique d'optimisation de type contrôle optimal appliquée à un problème d'assimilation de données en biogéochimie marine. Les variables de contrôle sont les paramètres intervenant dans les termes non-linéaires de réactions biologiques. On cherche un jeu de paramètres optimal minimisant une fonction coût, qui mesure l'écart au sens des moindres carrés entre les observations et les sorties correspondantes du modèle. Une étude de sensibilité préliminaire, utilisant le modèle tangent linéaire, ainsi que des expériences d'identification, utilisant le modèle adjoint, avec données simulées, sont menées. On utilise enfin la méthode pour assimiler des données réelles de la station Dyfamed en Méditerranée Nord-Occidentale.

6.6. Modélisation et Assimilation de données pour les inondations.

Participants : François-Xavier Le Dimet, William Castaings, Cyril Mazauric.

Le projet ANFAS est dédié à la mise en oeuvre d'un système d'aide à la décision pour la prévention des inondations. Une partie du travail a consisté en l'adaptation de modèles hydrauliques au site pilote du Val d'Ouzouer sur la Loire et à l'intégration de ces modèles dans l'outil global d'aide à la décision.

- Etude et analyse du code FESWMS (Finite Element Surface Water Modelling System de la US Federal Highway Administration). Code éléments finis 2D simulant l'écoulement et le transport sédimentaire en eaux peu profondes
- Etude préliminaire à l'adaptation d'un modèle mathématique bidimensionnel au site du Val d'Ouzouer sur la Loire moyenne.
- Pré-traitement des données topographiques, bathymétriques, hydrauliques et occupation des sols.
- Mise au point d'un maillage non-structuré sur la zone tenant compte des contraintes numériques et hydrauliques
- Adaptation du modèle FESWMS au Val d'Ouzouer. Calage du modèle FESWMS-Loire et simulation de scénarios hydrologiques et hydrauliques.
- Tests et évaluation des performances d'une version parallèle de FESWMS sur la grappe i-cluster de l'INRIA Rhône-Alpes.
- Etude et analyse du code DAVEF (de David Froehlich). Code volumes finis 2D simulant l'écoulement et le transport sédimentaire en eaux peu profondes
- Adaptation du modèle DAVEF au Val d'Ouzouer. Calage du modèle DAVEF-Loire et simulation de scénarios hydrologiques et hydrauliques.
- Tests et évaluation des performances d'une version parallèle de DAVEF sur la grappe i-cluster de l'INRIA Rhône-Alpes.
- Expertise hydraulique apportée lors de nombreuses réunions avec le consortium ANFAS pour l'intégration des modèles, la génération de nouveaux scénarios, le post-traitement des résultats, la visualisation, l'interface utilisateur etc ...

6.7. Données et modèles pour l'agronomie

Participants : François-Xavier Le Dimet, Wu Lin, Claire Lauvernet.

La modélisation commence à se développer activement en agronomie avec comme conséquence l'émergence de nouveaux problèmes, à savoir comment tenir compte des données d'observation dans les modèles et comment optimiser la croissance. Pour ces deux problèmes nous avons commencé la mise en oeuvre de méthodes de contrôle optimal. Les études se font à deux échelles différentes : celle de la parcelle avec des données satellitaires (Claire Lauvernet en collaboration avec l'INRA Avignon dans le cadre d'un projet CNES) et à l'échelle individuelle de la plante (Wu Lin en collaboration avec Ph. De Reffye et dans le cadre du LIAMA

L'une des perspectives du travail était la mise en place de la problématique avant le développement d'une méthode d'assimilation de données dans le modèle de végétation STICS (INRA-Avignon), objectif final du projet ADAM (Assimilation of Data into Agro-Models, CNES- INRA). On a donc d'abord dû procéder à une étude théorique de l'assimilation variationnelle et au fonctionnement des modèles de végétation. Enfin, l'étalonnage du modèle sur les paramètres variétaux correspondant aux caractéristiques du blé roumain Flamura s'est avéré indispensable. Les résultats de calibration ont été présentés sous forme de poster et d'articles au 1st Symposium of Remote Sensing à Valencia, Espagne, ainsi qu'aux Steering Committee of ADAM project, à Toulouse, Bucarest et Avignon. Enfin, le choix de la méthode de l'adjoint et de l'utilisation de l'outil de différentiation automatique TAPENADE (INRIA-Sophia-Antipolis) ont nécessité une étude précise du code de STICS.

6.8. Schémas d'ordre élevé pour le modèle shallow-water.

Participants : Eric Blayo, Christine Kazantsev, Eugène Kazantsev.

Le problème d'application de schémas d'ordre élevé a été étudié sur l'exemple du modèle bien connu du type "shallow-water". La stabilité et la performance de ces schémas ont été testées pour les différents processus physiques. L'étude a été faite sur les ondes d'inertie-gravité, la couche limite de Munk, et les ondes de Rossby. On obtient que les ondes d'inertie-gravité peuvent être modélisées avec un schéma stable de quatrième ordre. Par contre, la couche limite de Munk doit être résolue explicitement, car sinon les schémas d'ordre élevé

ont une erreur supérieure aux schémas classiques. La stabilité GKS des schémas compacts pour l'équation de continuité sur le maillage centré est prouvée. Un certain nombre d'expériences numériques a été fait avec le modèle shallow-water. Les résultats montrent que la solution du modèle discrétisé par le schéma compact d'ordre 4 équivaut à la solution classique d'ordre 2 avec triple résolution. Bien que l'intégration du modèle discrétisé par le schéma compact vaille entre 3 et 5 fois plus cher, le gain total de temps CPU pour la simulation d'un an est autour d'un facteur 4.

6.9. Avalanches et coulées de boue

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

La prévention des risques en montagne, des avalanches aux coulées de boue, passe par des simulations numériques de plus en plus poussées. Ces dernières mettent en œuvre des lois de comportement de matériaux complexes, comme les fluides à seuil ou les écoulements granulaires [82][83], [84] ainsi que des méthodes numériques délicates : volumes finis dans un cadre dynamique, maillages adaptatifs. Les essais peuvent être faits avec la montagne seule, ou en présence d'ouvrages d'art (pare-avalanches, déviateurs, digues) dont on cherche à ajuster la position.

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

Une collaboration avec le LEGI (Emil Hopfinger), le Cemagref (Dominique Laigle, Mohamed Naaim) et le laboratoire Gravir (Marie-Paule Cani, Fabrice Neyret) débute également, avec le soutien financier de l'INRIA (Action de Recherche Coopérative) et de l'INPG (Bonus Qualité Recherche). Jocelyn Etienne débute actuellement une thèse sur le thème des avalanches de neige poudreuse (aérosol).

6.10. Hydrologie

Participants : François-Xavier Le Dimet, Cyril Mazauric.

6.10.1. 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.

6.10.2. 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 [61]. Un modèle bi-dimensionnel gouvernant le système hydraulique est déduit des lois de conservation de masse et d'énergie, il est développé par le LASG de l'Institut de Physique de l'Atmosphère (Académie des Sciences, Chine) : c'est un système couplé de trois équations aux dérivées partielles ; l'écoulement fluvial est régi par une équation de type Saint-Venant ; le contenu en sédiment vérifie une équation de concentration, une loi empirique permet d'évaluer la déposition des sédiments. Pour compléter ces équations, des formules semi-empiriques sont utilisées pour déterminer les variables physiques comme la

capacité de transport solide et le taux de transport solide par unité de largeur. En discrétisant avec une méthode de différences finies adaptée à un maillage de « grille-C », nous résolvons numériquement les équations de Saint-Venant avec un algorithme à pas fractionnaire. Nous avons prouvé la stabilité et la convergence de cette méthode, ainsi que la conservation d'énergie des différences, qui permet une stabilité du calcul sur une longue période de temps.

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

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

En météorologie, une coopération ancienne avec Florida State University et le Département de météorologie de cette université a été relancée dans le domaine des modèles méso-synoptiques 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

7.1. Contrats nationaux

- Une collaboration déjà ancienne existe avec le Département de Recherche sur la Fusion Contrôlée du Centre d'Études Nucléaires de Cadarache sur les problèmes d'identification et de contrôle en physique des plasmas. Un nouveau contrat vient d'être signé avec le CEA (Cadarache) sur le problème d'identification en temps réel de la densité du courant dans TORE SUPRA.
- Un contrat avec le SHOM (Service Hydrographique de la Marine) traite des méthodes de maillage adaptatif et de zoom pour la circulation océanique (voir section 6.3).
- Un contrat avec le SHOM et IFREMER sur le thème "Modélisation côtière Sud-Bretagne" a été signé.
- Un contrat avec MERCATOR sur le thème "Couplage de modèles océaniques" a été signé.
- Un contrat avec MERCATOR sur le thème "Optimisation de la topographie, interaction avec les coordonnées verticales et conditions aux limites" a été signé.
- 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.
- Participation à PACTES, projet national sur la prévision des inondations en collaboration avec l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse, le CEMAGREF de Montpellier.

7.2. Contrats internationaux

Participants : François-Xavier Le Dimet, Cyril Mazauric, William Castaing.

Le projet IDOPT est partenaire du projet ANFAS.

Ce projet associe :

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

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

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

Participants : François-Xavier Le Dimet, Eugène Kazantsev.

IDOPT participe au projet commun avec l'Institut de Mathématiques Numériques de l'Académie des Sciences de Russie "Etude de la réponse de la circulation atmosphérique aux petites perturbations extérieures" soutenu par l'EGIDE.

Participants : Anestis Antoniadis, Gerard Grégoire.

Anestis Antoniadis est le coordinateur de la partie française du réseau de recherche européen de type "Interuniversity Attractions Poles", de 2002-2000, comprenant 5 Universités Belges (UCL, KUL, ULB, LUC, FUNP(NAMUR),), l'UJF (LMC) et une Université Allemande (Aachen) sur le thème "Statistical techniques and modeling for complex substantive questions with complex data".

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).

Interactions avec d'autres projets ou actions INRIA :

- PROJET APACHE : parallélisation d'algorithmes.

- 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 Analyse Géométrie et Applications (Paris 13) : décomposition de domaine et couplage de modèles
- 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).

- 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) est en cours 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.

8.4. 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 [72][75][44][51][86][90]. 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 [93].

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

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

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

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

8.4.3. Chine

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

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

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

8.4.4. Russie

Marina Kleptsyna, Chercheur à l'Institut des Problèmes de Transmission de l'Information de l'Académie des Sciences de Russie, a effectué un séjour sur invitation au CNRS en janvier-mars 2002. Elle a participé aux travaux se développant au sein du Projet dans le domaine de l'analyse des systèmes stochastiques, notamment autour des problèmes de filtrage, de contrôle et d'identification pour des systèmes de type fractionnaire.

Dans le cadre du projet "Etude de la réponse de la circulation atmosphérique aux petites perturbations extérieures" soutenu par l'EGIDE trois chercheurs russes ont visité l'IDOPT pendant un mois. Les travaux ont été poursuivis dans les directions suivantes

- Étude de la réponse globale de la circulation atmosphérique à l'anomalie de la température de surface de l'océan générée par le phénomène d'El-Niño avec les expériences numériques [60].
- Développement et approbation des méthodes approchées statistiques basées sur les relations fluctuo-dissipatives pour étude de la réponse de l'atmosphère aux petites perturbations extérieures.
- Développement de la méthode approchée dynamique utilisant les orbites périodiques instables pour l'étude de la sensibilité de modèles atmosphériques aux petites perturbations extérieures et pour la détermination de la réponse du modèle [62][63]

8.5. Visites, et invitations de chercheurs

- Luther White , professeur à l'Université d'Oklahoma département de mathématiques , 2 mois mai et Juin 2002,
- Marina Kleptsyna (Russie) 3 mois,
- Andrei Gritsoun (Russie) 1 mois,
- Andrei Glazounov (Russie) 1 mois,
- Nikolai Diansky (Russie) 1 mois,
- S.P. Yung, University of Hong Kong, 4 jours, Octobre 2002
- D. Furbish, Florida state University, 4 jours, Nov. 2002
- Y. Hussaini, Florida state University, 4 jours, Nov. 2002
- Mu Mu, Chinese Academy of Sciences, 3 jours, Avril 2002

9. Diffusion des résultats

9.1. Animation de la Communauté scientifique

- A. Antoniadis est membre du bureau éditorial de la revue de l'*ISUP* depuis 1992.
- A. Antoniadis est éditeur associé du Journal de la Société Française de Statistique depuis 1998.
- J. Blum est rédacteur en chef adjoint de la revue électronique ESAIM : COCV (*Control, Optimization and Calculus of Variations*).
- E. Blayo est membre du conseil des partenaires du CGCV (Centre Grenoblois de Calcul Vectoriel du CEA)
- J. Blum est 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.
- E. Blayo a organisé avec D. Bresch (Clermont) le colloque "Mathématiques et calcul scientifique pour l'océanographie", Grenoble, 7-8 mars 2002.
- F.-X. Le Dimet a organisé avec B. Sportisse l'Ecole Problèmes non-linéaires appliqués Assimilation de Données, Rocquencourt, 2002

9.2. Enseignement

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

- Méthodes de décomposition de domaine pour les EDP (E. Blayo)
- Méthodes numériques avancées pour l'hydrodynamique (21 heures, J. Monnier) ;
- Problèmes inverses en imagerie médicale (A. Antoniadis) ;
- Optimisation et contrôle de systèmes régis par des e.d.p. (J. Blum, DEA de l'Université de Nice)

9.3. Participation à des colloques, séminaires, invitations

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

10. Bibliographie

Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [1] E. BLAYO. *Modélisation numérique et assimilation de données en océanographie*. Habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier, Juillet, 2002.
- [2] B. FAUGERAS. *Assimilation variationnelle de données dans un modèle couplé océan-biogéochimie*. thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Octobre, 2002.
- [3] V. JANICOT. *Méthodes numériques pour la simulation de circuit électronique..* thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Decembre, 2002.
- [4] P. SARAMITO. *Algorithmes et logiciels pour la simulation numérique en fluides non-newtoniens*. Habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier, février, 2002.

Articles et chapitres de livre

- [5] I. HOTEIT, D. T. PHAM, J. BLUM. *A simplified reduces order Kalman filtering and application to altimetric data assimilation in the Tropical Pacific*. in « Journal of Marine Systems », numéro 1, volume 36, 2002, pages 101-127.
- [6] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON. *A Cameron-Martin type formula for general Gaussian processes - A filtering approach*. in « Stochastics and Stochastics Reports », numéro 3-4, volume 72, 2002, pages 229-250.
- [7] Z. LI, I. NAVON, M. HUSSAINI, F.-X. LE DIMET. *Optimal Control of cylinder wakes via suction and blowing*. in « Computers and fluids », volume 32, 2002, pages 149-171.
- [8] P. NGNEPIEBA, F.-X. LE DIMET. *Identification de paramètres : une application à l'équation de Richards*. in « ARIMA », volume 1, 2002.
- [9] F.-X. LE DIMET, J. BLUM. *Assimilation de données pour les fluides géophysiques..* in « Matapli », numéro 67, 2002, pages 33-55.
- [10] F.-X. LE DIMET, I. NAVON, D. DAESCU. *Second order information in Data assimilation*. in « Monthly Weather Review », volume 130, 2002, pages 629-648.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [11] A. ANTONIADIS. *Autoregressive Processes in Hilbert Spaces*. in « International conference on current advances and trends in nonparametric statistics », Hania, Crete, 2002.

- [12] A. ANTONIADIS. *Optimal testing in FANOVA models*. in « Workshop on statistical modelling and inference », Louvain-la-Neuve, Belgium, 2002.
- [13] A. BEN-ABDALLAH, A. S. CHARÃO, I. CHARPENTIER, B. PLATEAU. *Ahpik : A Parallel Multithreaded Framework Using Adaptivity and Domain Decomposition Methods for Solving PDE Problems*. in « Proceedings of the Thirteenth International Conference on Domain Decomposition Methods », pages 295-301, 2002.
- [14] E. BLAYO, V. MARTIN, L. HALPERN. *Conditions aux limites artificielles et couplage de modèles*. in « Colloque mathématiques et calcul scientifique pour l'océanographie », Grenoble, 2002.
- [15] J. BLUM. *Méthodes d'assimilation de données : théorie et applications*. in « Modélisation pour l'ingénierie des territoires », Paris, 2002.
- [16] J. BLUM. *Numerical identification of the plasma current density in a Tokamak*. in « 6ème Colloque Franco-Roumain de Mathématiques Appliquées », Perpignan, 2002.
- [17] J. BLUM. *Numerical identification of the plasma current density in a Tokamak fusion reactor : the determination of a non-linear source in an elliptic p.d.e.*. in « PICOFO 02 », Carthage, Tunisie, 2002.
- [18] J. BLUM, F.-X. LE DIMET. *Assimilation de données pour les fluides géophysiques*. in « Conference invitee-CANUM 2002 », Biarritz, 2002.
- [19] K. BOSAK, J. BLUM. *EQUINOX code for real-time plasma equilibrium reconstruction in tokamaks*. in « German-Polish Euro conference on plasma diagnostics », Greifswald, 2002.
- [20] I. CHARPENTIER, J. ESPÉNDOLA. *Analisis de sensibilidad de un modelo de columna eruptiva volcánica por diferenciación automática*. in « III Reunión nacional de ciencias de la tierra, Puerto Vallarta », México, 2002.
- [21] I. CHARPENTIER, N. JAKSE, F. VEERSÉ. *Second order exact derivatives to perform optimization on self-consistent integral equations problems*. in « Proceedings of Automatic Differentiation 2000 : From Simulation to Optimization », Springer-Verlag, pages 189-197, 2002.
- [22] A. CHARÃO, I. CHARPENTIER, B. PLATEAU, B. STEIN. *Generic parallel programming of domain decomposition methods on PC clusters*. in « Fourteenth International Conference on Domain Decomposition Methods », Cocoyoc, Mexique, 2002.
- [23] L. DEBREU, E. BLAYO. *Maillage adaptatif et couplages de modèles en océanographie*. in « Mini-Symposium Calcul scientifique parallèle, Congrès national d'Analyse Numérique », Anglet, 2002.
- [24] R. NOSENZO, P. DE REFFYE, F.-X. LE DIMET. *Modèles Mathématiques de conduite culturale*. in « Modélisation des agrosystèmes et aide à la décision », éditeurs E. MALÉZIEUX, M. J. ED., 2002.
- [25] I. PAUN, J. BLUM, I. CHARPENTIER. *Utilisation des bases d'ondelettes pour la réduction du coût de l'assimilation de données dans un modèle de circulation océanique*. in « 6^e Colloque Franco-Roumain », Perpignan, 2002.

- [26] D. T. PHAM. *Some variants to the Singular Evolutive Extended Kalman (SEEK) Filter for Data Assimilation*. in « Data Assimilation in the Oceanic and Atmospheric Sciences », Institute for Mathematics and its applications, 2002, <http://www.ima.umn.edu/geoscience/spring/g10.html>.
- [27] F.-X. LE DIMET, W. CASTAINGS, W. MAZAURIC. *Data Assimilation for floods modelling*. in « EuroChina 2002 », Pékin, 2002.
- [28] F.-X. LE DIMET. *Assimilation de Données*. in « Ecole Problèmes non-linéaires appliqués », Rocquencourt, 2002.
- [29] F.-X. LE DIMET. *Assimilation de données*. in « Université de Versailles », 2002.
- [30] F.-X. LE DIMET. *Error propagation in numerical geophysical flows*. in « Proceedings of the WMO Symposium on Climate Modelling », Shanghai, 2002.
- [31] F.-X. LE DIMET. *Mathematical problem in geophysics*. in « University of Minnesota », 2002.
- [32] F.-X. LE DIMET. *Méthodes du second ordre en hydrologie*. in « Programme National de Recherche en Hydrologie », Rocquencourt, 2002.
- [33] F.-X. LE DIMET. *Propagation d'erreurs et assimilation de données*. in « GDR MOMAS », Nice, 2002.
- [34] F.-X. LE DIMET. *Quelques problèmes mathématiques en météorologie*. in « Où en sont les mathématiques ? », ed. Jean-Michel Kantor, Publié par Vuibert, 2002.
- [35] F.-X. LE DIMET. *Variational methods and statistical information*. in « Statistical Methods in Oceanography », Florida state University, 2002.
- [36] F.-X. LE DIMET, P. NGNEPIEBA, L. DEBREU. *Etude de la sensibilité de l'erreur en assimilation de données*. in « CARI '02 », Yaoundé Cameroun, 2002.
- [37] F.-X. LE DIMET, P. NGNEPIEBA. *Second Order Methods for inverse problems : an application in hydrology*. in « 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering », Rio de Janeiro, Brésil, 2002.
- [38] F.-X. LE DIMET, J. YANG. *Models and data for the water cycle*. in « Mathematical Problems in Environmental Science and Engineering, Series in Contemporary Applied Mathematics », volume 4, éditeurs A. ERN, L. WEIPING., pages 41-65, Higher Education Press, Beijing, 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [39] L. DEBREU, E. BLAYO. *AGRIF : Adaptive Grid Refinement In Fortran*. rapport technique, INRIA, Juin, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rt-0262.html>.
- [40] M. KLEPTSZYNA, A. LE BRETON, M. VIOT. *About the linear-quadratic regulator problem under a fractional Brownian perturbation and complete observation*. rapport technique, numéro 4358, INRIA, Janvier, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4358.html>.

- [41] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON, M. VIOT. *New formulas around Laplace transforms of quadratic forms for general Gaussian sequences*. rapport technique, numéro 4357, INRIA, Janvier, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4357.html>.

Bibliographie générale

- [42] 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.
- [43] T. BLAKE, E. AL.. *Experimental evidence of nonlocal hydrodynamic influence on the dynamic contact angle*. in « Physics of fluids », numéro 8, volume 11, 1999, pages 1995-2007.
- [44] A. BLANC. *Incorporation of Side Constraint in a Minimum Variance Unbiased Estimation Procedure*. 1999, Rapport EMGIS, University of Oklahoma.
- [45] 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, pages 199-219.
- [46] E. BLAYO, L. DEBREU. *Adaptive mesh refinement for finite difference ocean models : first experiments*. in « J. Phys. Oceanogr. », volume 29, 1999, pages 1239-1250.
- [47] 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 », volume IMA Volume in mathematics and its applications 92, Springer, 1997, pages 17-36.
- [48] 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/>.
- [49] K. BOSAK. *Real-time numerical identification of plasma in Tokamak fusion reactor*. septembre, 2001, Mémoire de magistère.
- [50] 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.
- [51] W. CASTAINGS. *Solving singularly perturbed reaction-diffusion equations using mesh refinement strategies*. 1999, Rapport Super Computer Research Institute, FSU, Tallahassee.
- [52] I. CHARPENTIER. *The MesODiF package for gradients computations with the atmospheric model Meso-NH*. in « Environmental modeling and software », volume 15, pages 533-538, APMS98, Paris, 2000.
- [53] I. CHARPENTIER, C. FAURE. *Comparing global strategies for coding adjoints*. in « Scientific Programming », volume 9, 2001, pages 1-10.

- [54] I. CHARPENTIER, M. GHEMIRE. *Efficient adjoint derivatives : Application to the atmospheric model MESO-NH*. in « Optimization Methods and Software », numéro 1, volume 13, 2000, pages 35-63.
- [55] D. CHENAIS, J. MONNIER, J. VILA. *A shape optimal design problem with convective and radiative heat transfer. Analysis and implementation*. in « J. Optim. Th. Appl. », numéro 1, volume 110, 2001, pages 75-117.
- [56] J. CÉA. *Problems of shape optimal design*. éditeurs E. HAUG, J. CÉA., in « Optimization of distributed parameter structures », volume II, Sijthoff and Noordhoff, Alphen aan den Rijn, The Netherlands, 1981.
- [57] S. DURBIANO, E. BLAYO, J. VERRON, J. BLUM, F.-X. L. DIMET. *A reduced order strategy for 4D-Var ocean data assimilation..* in « soumis à Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. », 2002.
- [58] B. FAUGERAS. *On the well-posedness of a coupled one-dimensional biological-physical model for the upper ocean*. in « Mathematical Models and Methods in Applied Sciences », 2002, soumis.
- [59] P. D. GENNES. *Wettings : statics and dynamics*. in « Reviews Modern Phys. », numéro 3, volume 57, 1985.
- [60] A. GLAZOUNOV, N. DIANSKY, V. DYMNIKOV. *ocal and Global responses of the atmospheric circlation to the SST anomaly in the mid-latitudes..* in « Izvestya, Atmos. and Oc. Phys. », numéro 5, volume 37, 2001, pages 122-136.
- [61] Y. JUNQING, F.-X. LE DIMET. *Variational data Assimilation in the transport of sediment in river*. in « Science in China (Seres D) », volume 41, 1998, pages 473-485.
- [62] E. KAZANTSEV. *Sensitivity of the attractor of the barotropic ocean model to external influences : Approach by Unstable Periodic Orbits..* in « Nonlinear Processes in Geophysics », numéro 8, 2001, pages 281-300.
- [63] E. KAZANTSEV.. *Sensitivity of Attractor to external influences : Approach by Unstable Periodic Orbits..* in « Chaos, Solitons & Fractals », numéro 11, volume 12, 2001, pages 1989-2005.
- [64] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON. *Extension of the Kalman-Bucy filter to elementary linear systems with fractional Brownian noises*. in « Statistical Inference for Stochastic Processes », 2002, à paraître.
- [65] M. KLEPTSYNA, A. LE BRETON. *Statistical analysis of the fractional Ornstein-Uhlenbeck type process*. in « Statistical Inference for Stochastic Processes », 2002, à paraître.
- [66] J. LIONS. *Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivés partielles*. Dunod, 1968.
- [67] B. LUONG, J. BLUM, J. VERRON. *A variational method for the resolution of a data assimilation problem in oceanography*. in « Inverse Problems », volume 14, 1998, pages 979-997.
- [68] V. MARTIN. *An optimized Schwarz waveform relaxation method for unsteady convection diffusion equation in 2 dimensions*. in « soumis », 2002.
- [69] J. MONNIER. *Free convection with radiative thermal transfer of grey bodies. Analysis and approximation by finite element methods*. in « Math. Models Meth. Appl. Sc. », numéro 9, volume 10, 2000, pages 1383-1424.

- [70] J. MONNIER. *Shape Sensitivities in a Navier-Stokes Flow with Convective and Gray Bodies Radiative Thermal Transfer*. in « Optim. Control. Appl. Methods », 2003, pages à paraître.
- [71] J. MONNIER, P. WITOMSKI. *Wetting hydrodynamics with a self-induced Marangoni effect. Part I : Mathematical modeling and analysis..* A soumettre.
- [72] J. MOUNIER. *Comparison of two hydrologic infiltration models*. 1999, Rapport EMGIS, University of Oklahoma.
- [73] F. MURAT, J. SIMON. *Sur le contrôle par un domaine géométrique*. Publication du L.A. 189, Université P. et M. Curie Paris VI, 1976.
- [74] P. NGNEPIEBA, F.-X. LE DIMET, A. BOUNKONG, G. NGUETSENG. *Identification de paramètres : Une application à l'équation de Richards*. in « CPRSR (revue Hermès) », 2001, à paraître.
- [75] S. D. OMO. *Compact Finite-Difference schemes for the Dynamic Wave Routing*. 1999, Rapport EMGIS, University of Oklahoma.
- [76] D. PHAM. *A singular evolutive interpolated Kalman filter for data assimilation in oceanography*. rapport technique, numéro RT 163, LMC/IMAG, 1996.
- [77] 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.
- [78] D. PHAM. *Stochastic Methods for Sequential Data Assimilation in Strongly Nonlinear Systems*. rapport technique, numéro 3597, INRIA, décembre, 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3597.html>.
- [79] D. PHAM, J. VERRON, L. GOURDEAU. *Filtres de Kalman singuliers évolutifs pour l'assimilation de données en océanographie*. in « C. R. Acad. Sci. Paris, Science de la terre et des planètes », volume 326, 1998, pages 255-260.
- [80] D. PHAM, J. VERRON, M. ROUBAUD. *A singular evolutive extended Kalman filter for data assimilation in oceanography*. rapport technique, numéro RT 162, LMC/IMAG, 1996.
- [81] D. PHAM, J. VERRON, M. C. ROUBAUD. *A Singular Evolutive Extended Kalman Filter for Data Assimilation in Oceanography*. in « Journal of Marine Systems », numéro 3 & 4, volume 16, 1998, pages 323-340.
- [82] N. ROQUET, R. MICHEL, P. SARAMITO. *Errors estimate for a viscoplastic fluid by using P_k finite elements and adaptive meshes*. in « C. R. Acad. Sci. Paris, Série I », numéro 7, volume 331, 2000, pages 563-568.
- [83] N. ROQUET, P. SARAMITO. *An adaptive finite element method for bingham fluid flows around a cylinder*. 2001, soumis.
- [84] P. SARAMITO, N. ROQUET. *An adaptive finite element method for viscoplastic fluid flows in pipes*. in « Comput. Meth. Applied Mech. Eng. », volume 190, 2001, pages 5391-5412.

- [85] Y. SHIKHMURZAEV. *The moving contact line problem on a smooth solid surface*. in « Int. J. Multiphase Flow », numéro 4, volume 19, 1993.
- [86] C. TAMET. *Comparison of several minimization procedures for nonlinear problems*. 1999, Rapport Super Computer Research Institute, FSU, Tallahassee.
- [87] R. VERFÜRTH. *A Review of a Posteriori Error Estimates and Adaptive Mesh-Refinement Techniques*. Wiley-Teubner, 1997.
- [88] 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..* in « Aviso News letter », volume 5, 1997.
- [89] L. WHITE, B. VIEUX, F.-X. LE DIMET. *Estimation of optimal paramaters for a surface hydrology model*. rapport technique, University of Oklahoma, mai, 2000.
- [90] L. ZHIJIN, I. NAVON, M. HUSSAINI, F.-X. L. DIMET. *Optimal control of cylinder wakes via suction and blowing*. in « Journal of Computer and Fluids », 2001, à paraître.
- [91] F.-X. LE DIMET. *Automatic Differentiation in Data Assimilation*. in « Proceedings of IMACS Conference », Maui, USA, 1997.
- [92] F.-X. LE DIMET. *Modélisation et ressources en eau*. in « Actes de CARI », Dakar, 1998.
- [93] F.-X. LE DIMET. *Data Assimilation and Sensitivity with respect to observations*. rapport technique, numéro 1999-11-08, NASDA report, Tokyo, 1999.
- [94] F.-X. LE DIMET, H.-E. NGODOCK, B. LUONG, J. VERRON. *Sensitivity Analysis in Variational Data Assimilation*. in « J. of the Meteo. Soc. of Japan », numéro 1B, volume 75, 1997, pages 245-255.
- [95] F.-X. LE DIMET, J. PAILLEUX. *Assimilation de données en météorologie*. in « Problèmes inverses, de l'expérimentation à la modélisation », OFTA (ARAGO 22), 1999, pages 125-142.
- [96] 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.
- [97] F.-X. LE DIMET. *Sensitivity Analysis in the presence of data*. in « Proceedings of meeting of the Lyapunov Institute », Nancy, 1997.
- [98] F.-X. LE DIMET, I. NAVON, D. DAESCU. *Second order information in data assimilation*. in « Mon. Wea. Rev. », numéro 3, volume 130, 2002, pages 629-648, à paraître.
- [99] F.-X. LE DIMET, P. NGNEPIEBA, V. SHUTAYEV. *On error analysis in data assimilation*. in « Russian J. Anal. Math. Modelling », volume 17, 2001, à paraître.

- [100] F.-X. LE DIMET, V. SHUTAYEV, J. WANG. *The problem of data assimilation for soil water movement*. rapport technique, decembre, 2000.