

Projet ESTIME

Estimation de paramètres et modélisation en milieu hétérogène

Rocquencourt

THÈME 4B



*R*apport
d'Activité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	3
3	Fondements scientifiques	4
3.1	Problèmes inverses	4
3.1.1	D'où proviennent les problèmes inverses ?	5
3.1.2	Difficultés des problèmes inverses	5
3.2	Méthodes numériques pour les équations aux dérivées partielles	6
3.2.1	Éléments finis et volumes finis	6
3.2.2	Décomposition de domaines	7
3.2.3	Calcul parallèle	7
3.3	Méthodes numériques en optimisation	8
3.3.1	Algorithmes de points intérieurs non-linéaires	8
3.3.2	Autres méthodes numériques	9
4	Domaines d'applications	10
4.1	Inversion sismique	10
4.2	Imagerie cérébrale	11
4.3	Ecoulement et transport en milieu poreux pour les problèmes d'environnement	12
4.3.1	Transport de radionucléides autour d'un site de stockage profond	13
4.3.2	Déplacements diphasiques	13
4.3.3	Identification de conductivités hydrauliques dans un aquifère	14
4.4	Quelques applications de l'optimisation	14
5	Résultats nouveaux	15
5.1	Ecoulements en milieu poreux	15
5.1.1	Ecoulements en milieu fracturé	15
5.1.2	Transport de contaminants	16
5.1.3	Modélisation de source	16
5.1.4	Problèmes hyperboliques non-linéaires	17
5.1.5	Paramétrisation Interactive	17
5.1.6	Identifiabilité du coefficient de diffusion	17
5.2	Inversion sismique	17
5.3	Méthodes numériques pour la simulation acoustique	19
5.4	Méthodes numériques pour l'optimisation	19
5.4.1	Étude de chemins centraux en optimisation convexe	19
5.4.2	Méthodes de quasi-Newton et de points intérieurs	20
5.4.3	Préconditionnement quasi-newtonien en optimisation non-linéaire	20
5.4.4	Courbure, géodésiques et moindres carrés	21
5.5	Développement de codes d'optimisation	22
5.5.1	OPINeL : un code d'optimisation de problèmes non linéaires par points intérieurs et recherche linéaire	22

5.5.2	M4IP2 : un code d'optimisation de problèmes non linéaires par points intérieurs et régions de confiance	22
6	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	23
6.1	Problèmes inverses en optométrie	23
6.2	Transport de radionucléides autour d'un site de stockage profond	23
6.3	Conception de verres ophtalmiques progressifs	24
6.4	Traitement numérique des profils d'indice dans les fibres optiques	25
6.5	Mise au point de moteurs thermiques de voiture	25
6.6	Tomographie sismique	25
6.7	Aéroacoustique	26
7	Actions régionales, nationales et internationales	26
7.1	Actions nationales	26
7.2	Relations bilatérales internationales	26
8	Diffusion de résultats	27
8.1	Animation de la communauté scientifique	27
8.2	Enseignement universitaire	27
8.3	Autres enseignements	27
8.4	Participation à des colloques, séminaires, invitations	28
8.5	Conseil en entreprises	29
9	Bibliographie	29

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Jérôme Jaffré [DR, Inria]

Responsable permanent

Michel Kern [CR]

Assistante de projet (avec le projet Ondes)

Muriel de Bianchi [AJT]

Personnel Inria

François Clément [CR]

J. Charles Gilbert [DR]

Conseiller scientifique

Guy Chavent [Université Paris 9]

Collaborateurs extérieurs

Yann-Hervé De Roeck [Ifremer-Brest]

Paul Armand [Université de Limoges]

Chercheurs post-doctorants

Youssef Loukili [Université de Kenitra, Maroc, depuis le 1/10]

Jean-Marc Cognet [du 1/5 au 31/8]

Doctorants

Philippe Al Khoury [bourse Cifre Auxitrol, Universités de Paris 9 et 10]

Jean-Marc Cognet [bourse Inria, Université Paris 9, jusqu'au 30/4]

François Courty [en collaboration avec le projet Tropics, Université Paris 11]

Frédéric Delbos [Institut Français du Pétrole, Université Paris 6]

Xavier Jonsson [bourse Cifre ESSILOR, Université Paris 6]

Elizabeth Karas [Université Santa Catarina à Florianópolis (Brésil) et Université Paris 1 (thèse « sandwich »)]

Claire Leleu [bourse Inria, Université Paris 9, jusqu'au 30/9]

Vincent Martin [bourse Andra, Université Paris 9]

Stagiaires

Roland Morel [DESS, Université Paris 6 (du 5/3 au 31/8)]

Fadi Bouhanna [Maîtrise, Université Paris 11 (du 1/4 au 31/8)]

2 Présentation et objectifs généraux

La modélisation numérique des milieux hétérogènes nécessite la mise en œuvre d'un certain nombre de méthodes spécifiques. L'exemple le plus important d'un tel milieu est le sous-sol. D'une part, on cherche à réaliser des images de sa structure par des méthodes sismiques ou électromagnétiques ; ces problèmes sont par essence des problèmes d'estimation de paramètres. D'autre part, on modélise numériquement divers types d'écoulements en milieu poreux : transport de contaminants pour les problèmes d'environnement, ou déplacements d'hydrocarbures pour l'ingénierie pétrolière. Le cœur d'un réacteur nucléaire est un autre exemple de milieu hétérogène. Dans ce cas, on étudie son comportement neutronique.

Tous ces problèmes ont une physique compliquée et des techniques appropriées doivent être utilisées pour les modéliser numériquement. De plus, les milieux étudiés sont difficiles d'accès et l'estimation de paramètres joue donc un rôle essentiel dans leur modélisation.

S'appuyant sur l'expertise de ses membres concernant les méthodes numériques et les aspects théoriques et pratiques de l'identification, le projet Estime a pour objectif de mettre au point des méthodes à la fois efficaces et précises pour la résolution des problèmes mentionnés ci-dessus.

Les travaux de l'équipe sont centrés sur les domaines d'applications suivants :

- la modélisation numérique des écoulements de fluides en milieu poreux, avec applications aux problèmes d'environnement ou à la simulation de réservoirs pétroliers,
- l'inversion sismique,
- la modélisation numérique en neutronique.

La plupart de ces applications nécessitent de grandes ressources de calcul, et fournissent des exemples naturels pour utiliser le calcul parallèle. Le projet s'intéresse donc aux aspects algorithmiques (décomposition de domaines), ainsi qu'à la mise en œuvre effective de ces méthodes sur divers calculateurs parallèles.

Un aspect important de l'activité du projet provient de ce que les problèmes d'estimation de paramètres sont le plus souvent formulés sous forme de problèmes d'optimisation avec ou sans contraintes. Le projet cherche donc aussi à développer les techniques d'optimisation numérique pour les problèmes de grande taille. Outre les applications mentionnées ci-dessus, cette discipline touche aussi à d'autres domaines qui varient d'année en année ; mentionnons la conception optimale de verres ophtalmiques, le traitement numérique des profils d'indice dans les fibres optiques, l'optimisation de formes aérodynamiques, la mise au point de moteurs thermiques pour l'automobile, la tarification dans les réseaux de télécommunication.

3 Fondements scientifiques

3.1 Problèmes inverses

Mots clés : problème inverse, estimation de paramètre, moindres carrés.

Glossaire :

Problème mal posé Problème dont la solution n'existe pas, ou si elle existe, n'est pas unique ou ne dépend pas de façon continue des données

Moindres carrés On cherche à minimiser l'erreur quadratique entre les mesures réelles et les quantités correspondantes calculées par le modèle pour divers jeux de paramètres

Résumé : *Un problème inverse, ou d'estimation de paramètres, consiste à rechercher les coefficients d'une équation aux dérivées partielles, à partir de mesures sur sa solution. Une formulation aux moindres carrés utilisant les techniques de contrôle optimal est une façon naturelle de poser ce problème.*

Les problèmes inverses sont typiquement mal posés, ce qui donne une grande importance à leur formulation. D'autres difficultés spécifiques sont dues à la grande taille des problèmes rencontrés, au calcul exact du gradient de la fonction coût, au choix de la paramétrisation, ainsi qu'aux questions théoriques liées à l'identifiabilité.

3.1.1 D'où proviennent les problèmes inverses ?

Considérant une équation aux dérivées partielles ou un système de telles équations, le problème direct consiste à calculer la solution, connaissant les coefficients et les termes sources. Cependant, ces coefficients et ces termes sources sont souvent mal connus. Pour terminer la modélisation, il faut donc encore résoudre le problème inverse : étant données des mesures sur une observation de la solution, calculer une estimation des coefficients et/ou des termes sources de l'équation ou du système d'équations considéré.

La classe de problèmes considérés actuellement porte essentiellement sur l'estimation de coefficients. Ceux-ci peuvent dépendre soit de la variable d'espace, soit du temps, soit être des fonctions de la solution (non-linéarités de l'équation). Le problème d'estimation de paramètres est formulé comme un problème de minimisation au sens des moindres carrés, la variable de minimisation étant le vecteur des paramètres à estimer, et la fonction à minimiser étant une évaluation en norme L^2 de la différence entre l'observation calculée par le modèle avec un jeu donné de paramètres et celle mesurée effectivement. Dans les problèmes abordés le nombre de paramètres sera grand (d'une vingtaine à un million), ce qui conduit à l'utilisation pour l'optimisation de méthodes itératives de type gradient utilisant l'état adjoint.

3.1.2 Difficultés des problèmes inverses

Les problèmes inverses, tels qu'ils viennent d'être rapidement décrits, présentent de nombreuses difficultés liées à leur non-linéarité, à leur taille, au fait qu'ils sont très gourmands en temps de calcul et qu'ils sont souvent mal posés. Ils se formulent comme des problèmes d'optimisation, souvent de grande taille.

Depuis les travaux de J.-L. Lions et de G. Chavent au début des années 70 montrant comment résoudre les problèmes d'estimation de coefficients par les techniques de contrôle optimal, le savoir-faire a considérablement évolué et on peut aujourd'hui identifier les directions de recherche suivantes comme essentielles :

- Choix de la formulation : suivant la façon dont est formulé le problème inverse—choix des paramètres à estimer, choix de la fonctionnelle à minimiser—le problème de minimisation associé est plus ou moins bien posé. Une bonne compréhension du problème physique est nécessaire pour faire les bons choix.
- Choix de la paramétrisation : c'est souvent un problème non trivial de choisir la représentation discrète des paramètres à estimer. Ce choix a aussi une influence sur le conditionnement du problème de minimisation associé et sur l'unimodalité de la fonction coût, comme l'a montré le succès des paramétrisations multi-échelles.
- Génération automatique de logiciels : l'écriture de programmes calculant le gradient par la méthode de l'état adjoint est toujours longue et laborieuse, alors que cette procédure pourrait être automatisée. Deux voies, s'appliquant à des situations différentes sont possibles : génération automatique simultanée des programmes de calcul de la fonction à minimiser et de son gradient—ainsi le programme Gradj écrit en Maple et développé au sein de Ident et Estime—, ou génération du seul programme de calcul du gradient à partir d'un programme déjà existant de calcul de la fonction à minimiser—voie choisie par exemple par Odyssee développé au sein du projet Safir. Cette deuxième voie s'impose

quand de gros programmes de calcul existent déjà, alors que la première est plus adaptée quand le simulateur peut être réécrit.

- Efficacité dans la résolution du problème direct : dans les problèmes que nous considérons la résolution du problème direct est très coûteuse. On doit donc chercher à améliorer les techniques de résolution de ce problème—amélioration des méthodes numériques, utilisation du parallélisme—ou à utiliser des modèles simplifiés. Une partie de ce travail est fait en dehors du projet (par exemple dans le projet Ondes pour la sismique, et dans le projet Aladin pour l'algèbre linéaire).
- Identifiabilité : la question se pose toujours, de façon théorique et pratique, de savoir si les mesures sont suffisantes pour estimer les paramètres que l'on cherche, et comment l'incertitude sur les mesures se répercute sur les paramètres estimés. Les questions de stabilité et d'identifiabilité sont donc au cœur de l'estimation de paramètres et sont intimement liées au choix de la paramétrisation.
- Optimisation : les problèmes inverses se ramenant à des problèmes d'optimisation, il est nécessaire d'avoir à sa disposition des méthodes d'optimisation efficaces adaptées aux difficultés de ses problèmes, en particulier non-linéarité, grande taille, coût important de la fonction à minimiser.

3.2 Méthodes numériques pour les équations aux dérivées partielles

Mots clés : élément fini, volume fini, calcul parallèle, décomposition de domaine.

Glossaire :

Décomposition de domaine Technique de résolution d'un problème qui consiste à partitionner son domaine de définition en plusieurs sous-domaines.

MPI, Message Passing Interface Spécification d'une bibliothèque standard permettant de faire communiquer des processus s'exécutant sur des processeurs différents d'une machine parallèle.

Résumé : *Les méthodes de discrétisation appropriées pour les problèmes en milieu hétérogène sont les volumes finis centrés sur les mailles et les éléments finis mixtes ou mixtes-hybrides. Les méthodes de décomposition de domaine sans recouvrement permettent de décomposer le domaine de calcul en sous-domaines sur lesquels sont définis des modèles physiques différents. La mise en œuvre parallèle est une nécessité pour les problèmes de grande taille.*

3.2.1 Éléments finis et volumes finis

Les méthodes de volumes finis centrés sur les mailles sont particulièrement adaptées aux problèmes où les coefficients varient beaucoup. C'est le cas, en particulier, des problèmes concernant les écoulements en milieu poreux. Ainsi la composante normale vitesse de Darcy, $\vec{u} = -K \vec{\text{grad}}P$, reste régulière même lorsque la perméabilité absolue K varie beaucoup, pour satisfaire les propriétés de conservation des différents fluides (phases). Cette situation se retrouve dans d'autres applications comme la diffusion neutronique ou les semi-conducteurs. En utilisant les moyennes harmoniques de K , les méthodes de volumes finis centrés sur les mailles

permettent d'obtenir de bonnes approximations de la vitesse de Darcy, même lorsque K varie beaucoup, tout en respectant les propriétés de conservation au niveau de la maille de discrétisation.

Les méthodes d'éléments finis mixtes sont une généralisation de ces méthodes de volumes finis centrés sur les mailles qui, s'appuyant sur des formulations variationnelles, ont permis de traiter le cas des maillages non-structurés utilisant des mailles triangulaires ou tétraédriques. Les éléments finis mixtes ont permis aussi de traiter le cas où K n'est plus ni un coefficient scalaire ni même une matrice diagonale, mais une matrice pleine en dimension 2 ou 3. Cependant ces méthodes sont plus coûteuses que les méthodes de volumes finis puisqu'il faut résoudre un système linéaire pour déduire la vitesse \vec{u} de la pression P . De plus, étant plus abstraites car basées sur la formulation variationnelle, ces méthodes ont moins d'attrait pour les physiciens.

Une direction de recherche prometteuse explorée actuellement consiste à chercher des transformations algébriques permettant de calculer une approximation mixte en utilisant seulement des inconnues de type volume fini, ce qui permet de concilier la souplesse de l'approximation mixte et l'efficacité numérique des volumes finis.

3.2.2 Décomposition de domaines

Les méthodes de décomposition de domaines peuvent être utilisées en vue d'une implémentation parallèle efficace, mais elles peuvent être aussi un outil pour assembler des domaines dans lesquels des modèles physiques différents doivent être utilisés.

Pour les écoulements finis en milieux poreux, on peut être ainsi amené à utiliser un modèle monophasique dans une partie du domaine qui est saturée, un modèle diphasique ou triphasique dans une région qui est non-saturée, un modèle double porosité là où le milieu est fracturé, et des failles peuvent traverser le milieu. Parfois, même si le modèle ne change pas, une variation brusque du milieu—changement de type de roche—introduit des conditions de transmission non-standard sur l'interface.

Pour ce genre de problèmes, les méthodes de décomposition de domaine sans recouvrement sont appropriées. Elles permettent de faire coïncider les sous-domaines de calcul avec les sous-domaines physiques. Évidemment, ces méthodes doivent pouvoir utiliser des pas de temps locaux car les échelles de temps associées aux différents sous-domaines peuvent varier beaucoup.

3.2.3 Calcul parallèle

Comme cela a été souligné plus haut, aussi bien les problèmes inverses que la modélisation en milieu poreux sont de gros consommateurs de calcul. Il est donc naturel de se tourner vers les techniques utilisant le calcul parallèle, tant pour réduire le temps de calcul, que pour accéder à une mémoire plus importante.

Une classe de méthodes générales pour obtenir des algorithmes parallèles pour la résolution d'équations aux dérivées partielles sont les méthodes de décomposition de domaine. Ces méthodes ont été étudiées de façon intensive dans le cas des problèmes elliptiques. Elles constituent actuellement le moyen le plus général d'obtenir des applications portables et efficaces sur une large gamme d'ordinateurs parallèles. Leur mise en œuvre effective est facilitée par l'existence de bibliothèques telles que MPI. Nous étudions des extensions de leur champ

d'application dans différentes directions :

- Pour la simulation d'écoulements en milieu poreux. Il s'agit d'adapter la méthode à des problèmes avec des conditions de raccord non-standards sur l'interface, par exemple conditions de discontinuité, conditions non-linéaires, conditions non-locales.
- Pour le calcul de criticité dans les réacteurs nucléaires qui se formule comme un problème aux valeurs propres non-symétrique. Nous proposons d'étendre à ce problème la méthode de synthèse modale qui n'a été utilisée jusqu'ici que dans le cas d'opérateurs symétriques.
- Pour la simulation de la propagation des ondes par des méthodes d'éléments finis. L'utilisation des éléments d'ordre élevés développés au sein du projet Ondes conduit à une méthode explicite pour laquelle la mise en œuvre est plus simple que pour les problèmes stationnaires.

3.3 Méthodes numériques en optimisation

Mots clés : optimisation sous contraintes, algorithme de points intérieurs, algorithme de quasi-Newton, différentiation automatique.

Glossaire :

Algorithmes de points intérieurs Méthodes numériques d'optimisation adaptées à la résolution des problèmes soumis à un grand nombre de contraintes d'inégalité. Dans cette approche, les itérés sont maintenus dans l'intérieur du domaine admissible. On les qualifie de non-linéaires s'ils sont conçus pour résoudre des problèmes non linéaires.

Méthodes de quasi-Newton Méthodes numériques d'optimisation permettant de construire une approximation d'un hessien à partir des dérivées premières. Celles-ci permettent d'éviter le calcul coûteux des dérivées secondes et d'accélérer la convergence des algorithmes du premier ordre.

Différentiation automatique Méthodes numériques et informatiques permettant de générer un programme calculant en un point les dérivées d'une fonction qui n'est connue que par la donnée d'un autre programme informatique.

Les problèmes inverses ou d'estimation de paramètres considérés dans le projet Estime se formulent en général comme des problèmes d'optimisation d'une fonctionnelle de moindres carrés. C'est pourquoi il existe dans le projet une activité de recherche dans le domaine de l'optimisation.

En termes généraux, on s'intéresse aux méthodes numériques pour résoudre les problèmes qui reviennent à minimiser un critère scalaire $x \in \mathbb{R}^n \mapsto f(x) \in \mathbb{R}$, les variables à optimiser x devant éventuellement vérifier des contraintes d'égalité $c_E(x) = 0$ et d'inégalité $c_I(x) \leq 0$, où $c_E : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m_E}$ et $c_I : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m_I}$. Nous nous plaçons dans le contexte de l'optimisation différentiable, où les fonctions f , c_E et c_I sont régulières, par exemple de classe C^1 .

3.3.1 Algorithmes de points intérieurs non-linéaires

Les méthodes de points intérieurs (PI) sont récemment apparues comme pouvant offrir une approche intéressante pour résoudre des problèmes d'optimisation non-linéaires avec contraintes. Ces méthodes ont été introduites au milieu des années 80 en optimisation linéaire

(minimisation d'un critère linéaire sous des contraintes affines). Elles ont donné lieu à de nombreuses études après qu'à la suite des travaux de Karmarkar on ait montré qu'elles pouvaient être beaucoup plus efficaces que l'algorithme du simplexe jusqu'alors utilisé, notamment lorsqu'il y a un grand nombre de contraintes d'inégalité. Les algorithmes adaptés à l'optimisation linéaire sont à présent bien stabilisés.

Les succès remportés par les méthodes de PI en optimisation linéaire avec un grand nombre de contraintes ont conduit de nombreux chercheurs à étendre les concepts de base de l'approche à d'autres types de problèmes d'optimisation. Ces dernières années, d'importants efforts ont été fournis pour développer ces techniques en optimisation semi-définie positive (critère linéaire et contraintes de semi-définie positivité sur la valeur matricielle prise par une application affine des inconnues), en optimisation sous contraintes coniques (généralisation du problème précédent), en optimisation convexe, etc . . .

L'application de l'approche par PI aux problèmes d'optimisation non-linéaires généraux est plus récente et constitue une part importante de nos recherches. Ces problèmes sont très difficiles à résoudre, d'une part du fait des contraintes d'inégalité (parce que l'on ne sait pas à l'avance quelles vont être les contraintes c_i , $i \in I$, qui seront nulles – on dit actives – en la solution) et d'autre part du fait de la non convexité éventuelle de ces problèmes. L'approche par PI repousse astucieusement « à l'infini » la première difficulté, en introduisant un paramètre $\mu > 0$ perturbant les conditions d'optimalité, là où la combinatoire du problème s'exprime (dans les conditions de complémentarité). On fait tendre celui-ci progressivement vers zéro, pour forcer les itérés à se rapprocher de la solution. Cette technique permet donc de maîtriser la combinatoire intrinsèque de ces problèmes, liée à la détermination des contraintes actives. La seconde difficulté est plus classiquement surmontée par l'utilisation de techniques quasi-Newtoniennes ou d'une approche combinant région de confiance ou recherche linéaire et gradient conjugué tronqué.

Le projet développe deux codes d'optimisation non linéaire généralistes fondés sur cette approche : l'un utilise la recherche linéaire (OPINEL, voir la section 5.5.1), l'autre les régions de confiance (voir la section 5.5.2).

3.3.2 Autres méthodes numériques

Dans la résolution des grands problèmes, le calcul des dérivées premières et secondes reste une difficulté importante, malgré les progrès réalisés en différentiation automatique. En optimisation, les *méthodes de quasi-Newton* ont été conçues pour permettre de construire une approximation d'un hessien à partir de gradients calculés en divers points. On comprend bien en effet que la variation du gradient lorsque l'on passe d'un itéré à l'autre donne de l'information sur les dérivées secondes. Cette technique qui s'est beaucoup développée dans les années 70 et 80 continue à être étudiée pour s'appliquer à des contextes particuliers ou nouveaux . Citons :

- l'optimisation sur les variétés,
- les méthodes de points intérieurs,
- les problèmes de moindres-carrés non linéaires (pour approcher les dérivées secondes des résidus et accélérer ainsi l'algorithme de Gauss-Newton),
- génération dynamique de préconditionneurs quasi-newtoniens dans la résolution de systèmes linéaires en cascade.

Avec la *différentiation automatique*, on cherche au contraire à mettre à la disposition du numéricien des outils lui permettant de calculer les dérivées, en principe d'ordre quelconque, de manière efficace et précise, d'une fonction qui n'est connue que par un programme informatique. On distingue un mode direct et un mode inverse de différentiation. Le *mode direct* est bien adapté au calcul des dérivées directionnelles d'une fonction à valeurs vectorielles. Le *mode inverse* peut être vu comme une automatisation de la technique de l'état adjoint. Il permet de calculer toutes les dérivées partielles formant le gradient d'une fonction à valeurs scalaires en un temps qui est du même ordre que celui nécessaire à l'évaluation de la fonction. Il est donc intéressant en optimisation où le gradient est l'objet numérique de base.

4 Domaines d'applications

4.1 Inversion sismique

Participants : Guy Chavent, François Clément, Jean-Marc Cognet, J. Charles Gilbert, Michel Kern, Benoît Lavaud, Claire Leleu.

Mots clés : sismique, problème inverse, migration.

Glossaire :

MBTT, Migration-Based TravelTime Nom de la méthode d'inversion sismique développée à l'Inria-Rocquencourt. Après séparation des propriétés de propagation et de réflexion dans les paramètres recherchés, la méthode MBTT consiste essentiellement en l'introduction d'une inconnue de réflectivité en temps de parcours reliée à la réflectivité en profondeur par une étape de migration.

Migration Opération consistant à estimer une image de la réflectivité en profondeur du sous-sol à partir des données de sismiques-réflexion en réalisant une inversion linéaire approchée de l'équation des ondes. Elle dépend d'une hypothèse sur le propagateur dans le milieu.

Propagateur Inconnue représentant la partie lisse du paramètre vitesse de propagation des ondes, c'est-à-dire ses composantes basses fréquences spatiales.

Résumé : *Les recherches du projet ont pour but d'automatiser autant que possible l'inversion sismique. Elles sont fondées sur la méthode MBTT associée à différents modèles de propagation : équation des ondes acoustiques, approximation paraxiale, méthode de rayons.*

L'inversion sismique consiste à construire une image du sous-sol à partir de la mesure en surface de la réponse de ce sous-sol à des ébranlements sismiques. Ces réponses représentent la réflexion des ondes sismiques sur les interfaces entre les couches géologiques (réflecteurs).

L'état actuel de l'art de l'ingénieur consiste à faire une inversion « manuelle » des données sismiques, manuelle signifiant simplement qu'il n'y a pas d'algorithme conduisant automatiquement à la solution du problème inverse. Par ailleurs, il est certain que ces méthodes rencontrent de grandes difficultés quand la géométrie est compliquée ou dans le cas des fonds marins (problème des réflexions multiples).

L'inversion de données sismiques est, a priori, un cas particulier d'estimation de paramètres dans une équation aux dérivées partielles : il s'agit d'estimer la vitesse du milieu en chaque

point du sous-sol, ce qui donne ainsi l'image cherchée de ce sous-sol. Mais, à la différence de nombre de problèmes d'estimation de paramètres, dans la pratique, l'inversion sismique n'est pas en général un problème mal posé au sens habituel, car les données sont extrêmement redondantes. En effet, une fois que l'on a fait une hypothèse sur la vitesse avec laquelle les ondes acoustiques se propagent dans le sous-sol, en utilisant un opérateur de migration, les données enregistrées pour chaque tir permettent d'obtenir une image stable du sous-sol, mais limitée à la zone illuminée par le tir considéré. Ces images ne sont acceptables que si elles se superposent bien d'un tir à l'autre, ce qui n'a lieu que si l'hypothèse faite au départ sur la vitesse est correcte. C'est la détermination de cette « vitesse de migration » qui constitue la difficulté principale de l'inversion sismique : il s'agit d'arriver à mettre en cohérence les nombreuses images complexes du sous-sol obtenues à partir d'une campagne sismique pouvant comporter plusieurs centaines de tirs.

La formulation standard par moindres carrés est inefficace pour la détermination d'une vitesse de migration satisfaisante car de nombreux minima locaux rendent impossible la détermination du minimum global par des méthodes d'optimisation locales. Le nombre d'inconnues déterminant (la partie lisse de) la vitesse (quelques centaines à quelques milliers) et le coût d'une évaluation du critère (qui nécessite la résolution d'une équation des ondes par tir) limitent beaucoup l'intérêt des algorithmes d'optimisation globale. On est donc conduit à chercher des reformulations du problème susceptibles d'être résolues par des méthodes d'optimisation locale.

La reformulation MBTT (Migration-Based TravelTime), développée précédemment dans le projet Ident, a montré sa capacité à élargir de façon spectaculaire le domaine d'attraction du minimum global (travaux de F. Clément, R.-E. Plessix et B. Lavaud).

Ces travaux étaient soutenus depuis 1995 par l'industrie pétrolière sous la forme du consortium SIGMA. Malheureusement les concentrations intervenues dans ce milieu (acquisition d'Amoco par BP et d'Elf par Total Fina) ont amené à arrêter ce consortium début 1999.

Les axes de recherche actuels portent sur l'exploitation des possibilités ouvertes par ces travaux en vue de traiter des données plus complexes (prise en compte des multiples, inversion 3-D du fond de l'eau), en collaboration avec Ifremer (Y.-H. de Roeck). Une action de conseil s'est développée auprès de l'IFP à propos de la continuation en profondeur de données sismiques de surface (post-doc de B. Lavaud).

4.2 Imagerie cérébrale

Participants : Guy Chavent, François Clément.

L'imagerie cérébrale est un nouveau domaine d'application du projet. Il est développé en collaboration avec les projets Ondes et Robotvis, le Cermics, l'U.T.C. et des partenaires du milieu hospitalier dans le cadre d'Actions de Recherche Concertées (3D-MEG¹ et MC2), ainsi que de l'Action Concertée Incitative « Problèmes directs et inverses en EEG et MEG : Théorie, algorithmique et validation sur des cas d'épilepsie ».

Le problème inverse consiste ici à retrouver les densités de courant qui sont à l'origine de l'activité électromagnétique du cerveau. Il est alors très important de régulariser ce paramètre

¹<http://cermics.enpc.fr/~keriven/3dmeg/>

en en préservant les discontinuités, ainsi que de le contraindre de manière « raisonnable » anatomiquement à partir d'imagerie par résonance magnétique (IRM).

L'idée directrice est d'adapter les techniques issues du contrôle optimal développées pour l'inversion sismique : en particulier, la minimisation par optimisation locale d'une fonctionnelle d'écart aux données dont le gradient est calculé par état adjoint. Les indicateurs de raffinement, proposés par Ben Ameer, Chavent et Jaffré [BCJ99], donnent une approximation du premier ordre de l'effet sur les mesures de l'ajout de degrés de liberté au jeu courant de paramètres. Le problème du bruit sur les mesures est abordé par la méthode SOLA, proposée par Backus et Gilbert [BG68], qui repose sur la constatation de l'antinomie entre la recherche de l'effet minimum du bruit de mesure sur les paramètres estimés et une bonne résolution spatiale de cette estimation.

4.3 Écoulement et transport en milieu poreux pour les problèmes d'environnement

Participants : Clarisse Alboin, Hend Ben Ameer, Guy Chavent, Jérôme Jaffré, Jean Roberts², Xueweng Wang.

Mots clés : écoulement en milieu poreux, hydrogéologie, pollution, environnement, simulation de réservoir pétrolier, élément fini, volume fini, décomposition de domaine, problème inverse.

Résumé : *Les problèmes d'hydrogéologie sont des problèmes d'écoulement en milieu poreux dont la physique peut être très compliquée. L'objectif du projet est la mise au point de techniques performantes pour de tels problèmes, en particulier des méthodes basées sur les éléments finis mixtes et la décomposition de domaine sans recouvrement. Les problèmes d'estimation de paramètres sont aussi très importants car on n'a accès à la connaissance du sous-sol que très localement.*

La création récente du projet Estime correspond à un redémarrage de la modélisation numérique d'écoulements en milieu poreux en privilégiant les problèmes d'environnement, alors que dans le passé, l'accent avait été surtout mis sur les problèmes de réservoirs pétroliers.

Notre recherche dans ce domaine est orientée principalement suivant trois directions. Une première direction concerne la mise au point de techniques numériques performantes pour traiter des problèmes à la physique de plus en plus compliquée. Vu le caractère hétérogène du sous-sol, il s'agit d'associer domaines de calcul et régions homogènes et de coupler l'ensemble grâce aux méthodes de décomposition de domaines, avec éventuellement utilisation d'éléments joints quand les maillages ne se raccordent pas. Une deuxième direction concerne la modélisation des milieux fracturés. Ces deux sujets font l'objet d'une collaboration avec J. Roberts

²Projet Ondes

[BCJ99] H. BEN AMEUR, G. CHAVENT, J. JAFFRÉ, « Raffinement et déaffinement de paramétrisation pour l'estimation de conductivités hydrauliques », *Rapport de Recherche n° 3623*, Inria, Rocquencourt, France, 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3623.html>.

[BG68] G. BACKUS, F. GILBERT, « The resolving power of gross earth data », *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 16, 1968, p. 169–205.

du projet Ondes. Enfin nous mentionnerons comme troisième direction de recherche le problème de l'estimation des coefficients apparaissant dans les modèles : perméabilité absolue, perméabilités relatives, pression capillaire à partir des mesures disponibles.

Sur la modélisation directe comme sur les problèmes inverses une collaboration suivie existe avec P. Ackerer et R. Mosé de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg.

4.3.1 Transport de radionucléides autour d'un site de stockage profond

Un projet à long terme consiste à construire un modèle numérique du déplacement des radionucléides dans le sous-sol autour d'un site de stockage profond de déchets nucléaires dans le cadre d'études dirigées par l'Andra (Agence Nationale pour les Déchets Radioactifs, J. Jaffré fait partie de son Conseil Scientifique). Le déplacement est de type miscible (une seule phase) car les radionucléides sont dissous dans l'eau. Cela conduit à un système couplé de plusieurs équations de type diffusion-convection, modélisant le transport de chacun des radionucléides, et d'une équation elliptique, calculant le champ des vitesses de Darcy. Évidemment, le milieu considéré n'est pas homogène et est en fait composé de diverses couches géologiques. De plus, il faut prendre en compte la présence de fractures qui sont, dans les cas qui nous intéressent, des milieux poreux bidimensionnels de grande perméabilité. Si ces fractures ne sont pas trop nombreuses, on les modélisera individuellement. Lorsqu'elles sont trop nombreuses on doit avoir recours à des modèles appropriés (modèles à double porosité par exemple).

Les méthodes de décomposition de domaines sans recouvrement sont pour nous surtout un moyen de coupler les modèles différents utilisés dans les différentes parties du domaine, y compris les fractures les plus grandes. Elles doivent être associées aux méthodes d'éléments joints pour permettre d'associer entre eux des sous-domaines dont les maillages ne se raccordent pas. Enfin, les échelles de temps pouvant être très différentes suivant les sous-domaines, les techniques de pas de temps locaux doivent être utilisées. Rappelons à ce propos que l'ordre de grandeur de la durée d'une simulation pour le problème considéré est la dizaine de milliers d'années.

4.3.2 Déplacements diphasiques

Malgré sa relative simplicité physique, le modèle des déplacements diphasiques en milieu poreux reste un problème modèle très intéressant. Dans le cas incompressible, il se ramène à une équation de diffusion-convection non-linéaire dont le terme de diffusion dégénère couplée à une équation elliptique.

On s'intéresse au cas d'un milieu hétérogène où les hétérogénéités se traduisent par des discontinuités dans les non-linéarités du système au passage d'un type de roche à l'autre. Cependant certaines quantités restent continues (composante normale des vitesses de Darcy et pression de chacune des phases, pression capillaire) alors que d'autres sont discontinues (saturation et pression globale). Cela conduit naturellement à l'utilisation de techniques de décomposition de domaines sans recouvrement non-linéaires et avec des conditions aux interfaces non-standards.

Pour la discrétisation, les méthodes de volumes finis basées sur les éléments finis discontinus et les éléments finis mixtes-hybrides sont particulièrement appropriées. Dans ce cadre, on utilisera des méthodes de décomposition de domaine sans recouvrement. Là encore, on étudiera l'utilisation de pas de temps locaux appropriés à la physique des différents domaines. Les techniques étudiées devront être assez robustes pour permettre le passage au cas limite sans diffusion capillaire.

4.3.3 Identification de conductivités hydrauliques dans un aquifère

Comme il n'est pas possible d'avoir une connaissance directe des conductivités hydrauliques dans un milieu saturé en eau, il est nécessaire de les estimer à partir des mesures piézométriques disponibles en un certain nombre de puits. Il s'agit en fait de l'estimation du coefficient de diffusion dans une équation parabolique. On utilise pour cela une méthode de moindres carrés.

Cependant, d'une part le nombre de mesures est très insuffisant pour estimer une valeur de conductivité par maille, mais d'autre part ce coefficient est en réalité constant par zone en raison de la géologie, les zones n'étant pas connues. Pour en tenir compte, différentes approches sont possibles. Par exemple, on peut régulariser la fonction à minimiser par la norme L^1 du gradient du paramètre à estimer, comme cela a été proposé par K. Kunisch. Des techniques semblables sont utilisées en traitement d'images. Une autre façon de procéder consiste à utiliser des indicateurs de raffinement introduits par G. Chavent et qui permettent de découper le domaine en un nombre « minimum » de zones où les paramètres sont constants. Ces indicateurs sont calculés à partir du gradient de la fonction à minimiser, considérée comme dépendant d'un paramètre par maille de discrétisation ; le gradient étant calculé par la méthode de l'état adjoint.

4.4 Quelques applications de l'optimisation

Participants : François Courty³, Alain Dervieux³, J. Charles Gilbert, Xavier Jonsson.

Mots clés : verres ophtalmiques, formes aéronautiques, fibres optiques, moteurs thermiques de voiture.

Résumé : *Les applications de l'optimisation sont très nombreuses. Outre l'estimation de paramètres, la commande optimale et l'optimisation de forme sont des sources importantes de problèmes d'optimisation.*

Les applications de l'optimisation sont nombreuses, variées et constamment renouvelées. La démarche est souvent la suivante. Au départ, le modèle décrit une situation où il s'agit de déterminer un ensemble de paramètres de manière à minimiser un critère. Le plus souvent il s'agit de modèles en dimension infinie. Après discrétisation (en espace et/ou en temps), on se ramène à un problème d'optimisation avec contraintes, en dimension finie, de forme standard.

Outre les problèmes d'estimation de paramètres déjà mentionnés (en sismique et pour les écoulements en milieu poreux), on présente quelques applications en cours d'étude pour lesquelles on trouvera des informations plus loin :

³Projet Tropics

- *La conception optimale de verres ophtalmiques progressifs.* Pour concevoir des verres ophtalmiques progressifs destinés à corriger la presbytie, on est amené à déterminer l'équation d'une surface progressive (placée en général sur la face avant du verre) de manière à obtenir les propriétés de correction prescrites pour un porteur donné (puissance du verre pour la vision de près et de loin). La géométrie particulière de celle-ci en fait une surface asphérique et introduit un astigmatisme de surface, de même nature que l'astigmatisme cornéen d'un porteur. Le contrôle de cet astigmatisme est une tâche importante lors de la conception d'un design progressif. Cela conduit à un problème de moindres carrés non linéaire avec contraintes d'égalité et d'inégalité, où l'on cherche à minimiser les écarts entre des grandeurs de nature géométrique ou optique évaluées en certains points de la surface progressive ou pour certaines directions de regard, et celles souhaitées pour le verre optimisé. Ce travail a été proposé par la société ESSILOR (Saint-Maur-des-Fossés). Pour plus d'information, voir la section 6.3.
- *Optimisation de formes en aéronautique.*
- *Traitement numérique des profils d'indice dans les fibres optiques.* Voir la section 6.4.
- *Mise au point de moteurs thermiques de voiture.* Voir la section 6.5.
- *Tomographie sismique.* Voir la section 6.6.

5 Résultats nouveaux

5.1 Ecoulements en milieu poreux

Participants : Clarisse Alboin, Hend Ben Ameer⁴, Fadi Bouhanna, Guy Chavent, Magne Espedal⁵, Jérôme Jaffré, Michel Kern, Vincent Martin, Roland Morel, Jean Roberts⁶.

Mots clés : fractures, double porosité, décomposition de domaine, problème inverse, changement d'échelles.

5.1.1 Ecoulements en milieu fracturé

L'échelle considérée est telle que les fractures ou failles, considérées elles-mêmes comme un milieu poreux de grande perméabilité, peuvent être modélisées individuellement. Les fractures sont alors représentées par des interfaces. Des techniques habituelles de sous-structuration (décomposition de domaines sans recouvrement) permettent alors de se ramener à un problème sur les interfaces. Toutefois l'opérateur d'interface obtenu est non standard et mal conditionné. C'est la somme d'un opérateur de type laplacien vivant uniquement sur l'interface et d'un opérateur non local de type Steklov-Poincaré. Des recherches d'un préconditionneur efficace se sont alors avérées nécessaires.

Des essais numériques ont montré des résultats encourageants : en utilisant le code développé par Roland Morel pendant son stage [18] et sur une idée de Yves Achdou⁷, Vincent

⁴Université de Bizerte, Tunisie

⁵Université de Bergen, Norvège

⁶Projet Ondes

⁷Université Paris 7

Martin a remarqué une convergence beaucoup plus rapide en ne préconditionnant que la partie purement locale de l'opérateur.

De plus amples recherches semblent nécessaires pour confirmer théoriquement la validité de ce préconditionneur.

Dans un travail commun avec Magne Espedal, Jean Roberts, Jérôme Jaffré et Vincent Martin ont étudié la validité du modèle présenté dans la thèse de Clarisse Alboin et l'ont étendu au cas où la fracture est remplacée par une barrière géologique (faible perméabilité).

Des tests numériques confirment la validité du nouveau modèle avec barrière.

5.1.2 Transport de contaminants

Neumann-Neumann Dans le cadre de son stage de DESS [18], Roland Morel a étudié le comportement de l'algorithme de Neumann-Neumann. L'objectif était de tester le préconditionneur de Neumann-Neumann avec équilibrage (« balancing Neumann-Neumann ») dans le contexte des milieux poreux.

Il a ainsi développé un code Matlab 2D à partir de cet algorithme avec des solveurs par sous-domaines utilisant des éléments finis mixtes hybrides. Les tests qu'il a effectués sur un exemple de milieu poreux fracturé sont conformes aux résultats théoriques : ils montrent en particulier l'utilité du solveur grossier quand le nombre de sous-domaine augmente, et d'autre part la sensibilité –modérée– de la vitesse de convergence par rapport à la forme du sous-domaine (« aspect ratio »).

Décomposition de domaines avec maillages non raccordés V. Martin a poursuivi ses travaux de thèse sous la direction de J. Roberts et J. Jaffré. Lors de sa participation à l'Ecole d'été Cemracs 2001 consacrée aux problèmes multi-échelles, il a contribué, en partenariat avec S. Wagner⁸, à un projet financé par l'ANDRA. Le but de ce projet était de valider l'utilisation de la décomposition de domaines non conformes pour traiter le terme source. Grâce à cette technique on peut en effet opérer un raffinement *local* autour du site de stockage.

V. Martin a ainsi développé un code écrit en C++, utilisant la décomposition de domaines 2D avec maillages non raccordés et basé sur des volumes finis centrés sur les mailles. Les conditions d'interface sont de type Robin-Robin. Un cas-test de diffusion de contaminants autour d'un site de stockage dans une couche d'argile, utilisant des coefficients réalistes, a pu être mis en œuvre. Les résultats ont ainsi montré la pertinence de cette approche.

5.1.3 Modélisation de source

Dans le cadre d'un stage de maîtrise de l'université de Paris 11 (sous la direction de M. Kern), F. Bouhanna a étudié la modélisation fine d'un site de stockage de déchets radioactifs. Un tel site comporte un grand nombre de modules, chaque module étant lui-même constitué de plusieurs conteneurs. Il est difficile, pour ne pas dire impossible, de prendre en compte chaque colis individuel dans une modélisation de « champ lointain », c'est pourquoi des techniques asymptotiques sont étudiées par A. Bourgeat (Université de Lyon). le but du stage était de fournir une solution de référence prenant en compte un traitement détaillé du site.

⁸Doctorant, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italie

Nous avons utilisé pour cela le logiciel Parssim, mis au point à l'Université du Texas dans l'équipe de M. Wheeler. Ce travail a ainsi mis en évidence l'existence de deux comportements différents selon que la source est active ou non :

- Aux temps courts (la source n'est pas active), chaque colis est visible individuellement ;
- Aux temps longs (en fait dès l'arrêt de la source), on ne voit plus que les modules, ce qui justifie le recours aux techniques d'homogénéisation.

5.1.4 Problèmes hyperboliques non-linéaires

Lorsqu'on modélise les écoulements diphasiques dans un milieu à plusieurs types de roches, en négligeant la capillarité, on obtient une équation hyperbolique non-linéaire avec une fonction de flux discontinue en espace. Cette équation avait déjà été étudiée pour le cas où, à la frontière entre les deux types de roche les fonctions de flux ne se coupent pas. Avec Adimurthi et Veerappa Gowda du Tata Institute à Bangalore, India, Jérôme Jaffré a étendu l'étude au cas où les fonctions de flux se coupent, démontrant la convergence d'une famille de schémas numériques de type volumes finis utilisant des solveurs de Riemann appropriés.

5.1.5 Paramétrisation Interactive

La collaboration avec Hend Benameur, de l'Université de Bizerte, s'est poursuivie sur ce sujet en vue d'explorer le comportement de la méthode des indicateurs de raffinement lorsque seules des mesures partielles sont disponibles et que ces mesures sont entachées de bruit. La méthode a montré une bonne robustesse de ces deux points de vue, et les résultats sont présentés dans un article soumis à publication, dont un preprint est disponible sous forme de rapport Inria.

5.1.6 Identifiabilité du coefficient de diffusion

Suite au travail effectué avec Karl Kunisch, de l'Université de Graz, sur l'identifiabilité du coefficient de diffusion dans une équation elliptique bidimensionnelle, une première étude d'une méthode de régularisation adaptée a été effectuée dans le cadre de la collaboration avec le LAMSIN de l'ENIT à Tunis (mémoire de DEA de Hadel Hamdi). On a ainsi pu prouver que cette régularisation permettait d'assurer la stabilité du coefficient, et les premiers résultats numériques confirment que cette régularisation rentre peu en conflit avec les informations apportées par les données.

5.2 Inversion sismique

Participants : Guy Chavent, François Clément, Jean-Marc Cognet, Claire Leleu, Youssef Loukili.

Mots clés : estimation de la vitesse, estimation de la source, formulation en temps, approximation paraxiale, lissage.

La thèse de J.-M. Cognet, portant sur l'inversion de données sismiques 2D, a été soutenue en mai 2001, sous la direction de G. Chavent, Y.-H. De Roeck et F. Clément. Après avoir

étendu l'opérateur de simulation Born+Rais à la prise en compte des réflexions multiples du fond de l'eau, via l'introduction de deux nouveaux paramètres (bathymétrie et coefficient de réflexion), des tests d'inversion ont été effectués sur données synthétiques. Pour un coefficient de réflexion supposé connu, le schéma d'inversion consiste à utiliser l'opérateur Born+Rais pour identifier dans un premier temps la bathymétrie, puis l'opérateur Born+Rais+Multiples pour estimer le milieu de vitesse puis la source et la réflectivité. Les résultats obtenus ont été présentés à la conférence SMAI 2001. J.-M. Cognet a ensuite prolongé son contrat de trois mois pour inverser des données réelles enregistrées par l'Ifremer à l'aide des nouveaux outils numériques développés.

C. Leleu a terminé ses travaux de thèse visant au traitement de données de sismique marine Très Haute Résolution Tri Dimensionnelle (THR 3-D) sous la direction de G. Chavent, F. Clément et Y.-H. De Roeck. Ce projet est lié à la détermination des paramètres géotechniques (positions des sources et des récepteurs) dans les données. La connaissance de ces paramètres est non négligeable dans l'imagerie THR 3-D car la précision requise liée à l'imagerie est de l'ordre du décimètre. La prise en compte des variations de positions des paramètres géoacoustiques, soumis à la houle, s'avère donc non négligeable afin de pouvoir mieux déterminer la bathymétrie du domaine étudié. Comme première étape du traitement des données marines THR 3-D, nous avons élaboré un simulateur, intégrant un masque de réflectivité. Ce dernier permet, non seulement de limiter la durée des temps de calcul mais aussi de ne considérer que les zones de réflectivité contribuant effectivement au calcul des solutions pour le modèle de terrain donné (prise en compte d'un angle de pendage maximal). Les solutions obtenues ont été validées par comparaison avec les solutions analytiques 3-D dans le cas d'un milieu bi-couche homogène. Cette étape de validation a renforcé la nécessité de caractériser automatiquement la discrétisation idéale à choisir. La deuxième étape dite « d'inversion » vise à estimer les paramètres de réflectivité et les coordonnées cartésiennes des sources et récepteurs (X) à partir des données. La minimisation de la fonction coût associée au problème se formule au travers d'une étape de migration en profondeur et a été réalisée via un algorithme d'optimisation itératif de gradient conjugué moindres carrés CGLS (Conjugate Gradient Least Squares). La recherche du paramètre X , dit paramètres cinématiques, est opérée au moyen de la formulation MBTT (Migration based Travel Time). Dans le souci d'économiser le temps de calcul, nous avons mis en place une paramétrisation de X : on considère les variations du dispositif en fonction d'un ensemble d'angles de déplacement (Θ) liés à la direction des tirs et à la force du courant marin. C'est ce nouvel ensemble de paramètres Θ , moins volumineux, qui est recherché par minimisation de la fonction coût associée. Pour lever en partie la non linéarité du modèle par rapport au paramètre Θ , un changement de paramètre de réflectivité est réalisé dans le domaine en temps via l'approche MBTT (Migration-Based TravelTime). Cette approche permet alors de recouvrer les paramètres cinématiques lorsque la couverture du domaine à imager est suffisante. La recherche des paramètres cinématiques est réalisée par une méthode de minimisation locale sous contraintes (développée à l'Inria (m2qn1)). Des résultats significatifs sur des données synthétiques ont été obtenus qui permettent de recouvrer la position du dispositif d'acquisition à réflectivité connue ou la position du dispositif d'acquisition et la réflectivité par minimisations alternées. Le code principal a été réalisé en Fortran 90 et est portable (plateformes Alpha/Linux/SunOS).

L'objectif du post-doc de Y. Loukili, en collaboration avec G. Chavent, F. Clément et Y.-

H. De Roeck, est de poursuivre le développement des codes de J.-M. Cognet et C. Leleu, ainsi que leur valorisation par des tests numériques sur des données réelles fournies par l'Ifremer. Il a commencé par l'écriture d'une interface adaptée à la lecture et l'écriture de données au format SEG-Y, couramment utilisé dans le domaine pétrolier.

5.3 Méthodes numériques pour la simulation acoustique

Participant : Michel Kern.

Mots clés : élément fini, calcul parallèle.

M. Kern a poursuivi un travail de validation du code parallèle développé par P. Havé. L'exemple utilisé est une modification d'un modèle de l'IFP, et les calculs ont été réalisés sur la grappe de PC ICluster de l'INRIA Rhône-Alpes. Le maillage (qui comporte 3 millions de tétraèdres), et la visualisation des résultats ont été réalisés avec les logiciels GHS3D et Medit, du projet Gamma.

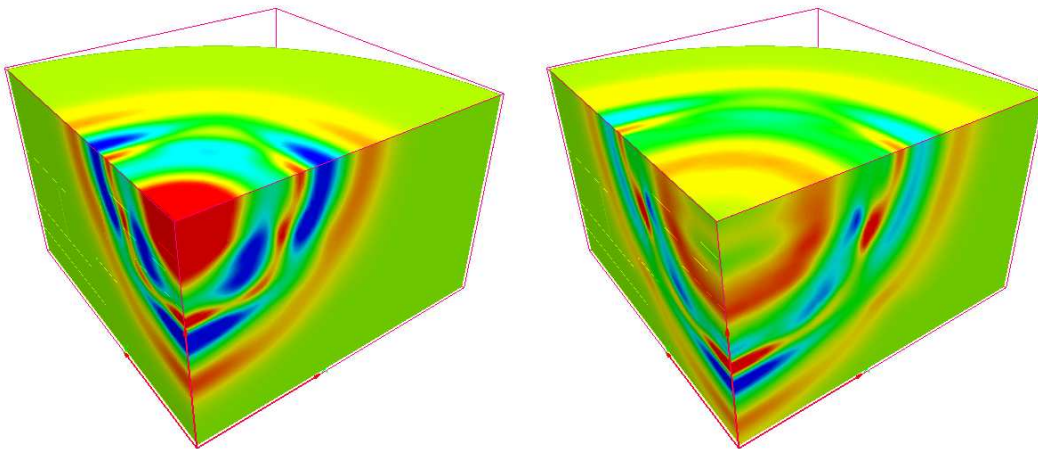


FIG. 1 – À gauche : solution à $t = 0.5$ s, À droite : solution à $t = 0.7$ s

5.4 Méthodes numériques pour l'optimisation

5.4.1 Étude de chemins centraux en optimisation convexe

Participants : J. Charles Gilbert, Clovis Gonzaga, Elizabeth Karas.

Dans les méthodes de points intérieurs (PI), le chemin central est le tracé qui sert de guide aux itérés et les conduit vers une solution du problème d'optimisation. Ce chemin converge en effet, dans les bons cas, vers la solution du problème ou une solution particulière (centre analytique) en cas de solutions multiples. Cette stratégie de suivi de chemin a été couronnée de succès

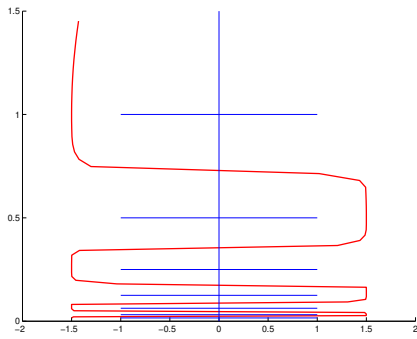


FIG. 2 – Chemins centraux en forme d'antenne ou en zigzag

pouvoir étendre les bons résultats de convergence des algorithmes de PI obtenus pour d'autres classes de problèmes.

en optimisation linéaire, quadratique convexe et en programmation semi-définie, permettant d'obtenir de bons résultats de complexité et de vitesse de convergence. Nous avons montré [5], qu'en optimisation convexe, la situation pouvait être beaucoup plus complexe. Pour un critère convexe de classe C^∞ et une contrainte linéaire, le chemin central peut être une courbe très irrégulière, présentant par exemple un nombre infini de lacets venant s'accumuler sur un sous-ensemble de solutions (le chemin central ne converge donc pas dans ce cas) ; voir la figure 2. Dans ces situations, il n'est certainement pas intéressant de suivre ce chemin pour trouver un minimiseur ! La convexité n'est donc pas une propriété suffisamment forte pour

5.4.2 Méthodes de quasi-Newton et de points intérieurs

Participant : J. Charles Gilbert.

Les algorithmes de points intérieurs en optimisation peuvent se voir comme des méthodes de pénalisation, dans lesquelles les problèmes pénalisés sont résolus par des techniques primales-duales. Dans leur application à la résolution des problèmes non linéaires, on ne connaît pas de bonnes règles de décroissance du paramètre de pénalisation $\mu > 0$; les codes opérationnels se contentent de le faire tendre vers sa valeur limite nulle en le divisant régulièrement par un facteur constant. On appelle itération externe l'ensemble des itérations minimisant la fonction pénalisée pour un terme de pénalisation constant (ces dernières sont qualifiées d'internes).

Récemment diverses études ont proposé des règles de décroissance de μ qui sont telles qu'il suffit de faire une seule itération interne par itération externe. De plus les itérés convergent rapidement vers la solution du problème. La règle proposée dans [GOST00] permet d'obtenir la convergence sous-quadratique. Nous avons montré que l'utilisation de cette technique dans la version quasi-newtonienne des algorithmes de points intérieurs, dans le cadre des problèmes convexes, permettait d'obtenir la convergence linéaire des itérés (rapport en préparation).

5.4.3 Préconditionnement quasi-newtonien en optimisation non-linéaire

Participants : J. Charles Gilbert, Xavier Jonsson.

Considérons le problème d'optimisation sans contrainte

$$\min \{f(x) : x \in \mathbb{R}^n\},$$

[GOST00] N. GOULD, D. ORBAN, A. SARTENAER, P. TOINT, « Superlinear convergence of primal-dual interior point algorithms for nonlinear programming », *Mathematical Programming* 87, 2000, p. 215–249.

où $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction numérique deux fois différentiable. Dans les algorithmes de Newton tronqué, les itérés sont calculés en résolvant une suite de problèmes quadratiques. L'idée de se servir des informations recueillies au cours de la résolution des problèmes quadratiques précédents pour construire un préconditionneur du problème quadratique courant n'est pas nouvelle. Cette technique est utile lorsque l'utilisateur ne peut pas fournir de préconditionneur naturel. Nous l'utilisons aussi dans les codes d'optimisation généralistes que nous développons (voir section 5.5), en particulier dans les méthodes de points intérieurs dans lesquelles les hessiens des problèmes quadratiques sont formés de quantités provenant de l'approche algorithmique (c'est le hessien réduit du lagrangien pénalisé), qui n'ont pas de signification évidente pour l'utilisateur.

Dans notre étude [2, 17], de nature théorique, nous nous sommes intéressés au cas où le préconditionneur est construit par des mises à jour quasi-newtoniennes de BFGS au cours des itérations de gradient conjugué résolvant les problèmes quadratiques et où l'algorithme utilise des régions de confiance. Le schéma de l'algorithme est classique, si ce n'est qu'une matrice de préconditionnement variable, notée P_k , intervient dans la définition de la *région de confiance*, qui est l'ellipsoïde de \mathbb{R}^n

$$\mathcal{R}_k = \{d \in \mathbb{R}^n : (d^\top P_k d)^{\frac{1}{2}} \leq \Delta_k\}.$$

Évidemment la forme de \mathcal{R}_k varie au cours des itérations, du fait de la mise à jour de P_k et du rayon de confiance Δ_k . On construit ainsi une suite de normes sur \mathbb{R}^n , associées à P_k , qui s'adaptent à la courbure courante de f et permet d'accélérer la convergence de l'algorithme. L'étude théorique de cette méthode demande de prendre en compte la nature quasi-newtonienne du préconditionnement. En effet, on ne peut pas affirmer que les normes associées aux matrices P_k soient *uniformément* équivalentes à la norme euclidienne. La preuve de convergence ne peut alors être déduite du cas classique où l'équivalence des normes est supposée. Nous avons ainsi montré que l'algorithme qui vient d'être brièvement décrit assure la convergence vers zéro d'une sous-suite des gradients (convergence partielle).

De nombreux tests numériques ont été réalisés sur des problèmes industriels tels que ceux de l'optimisation des verres ophtalmiques progressifs, ainsi que sur une collection de problèmes de nature plus académique [2]. Ils ont montré l'intérêt manifeste de l'utilisation de ces préconditionneurs BFGS. Il est en effet courant de voir le nombre total d'itérations de gradient conjugué diminué de moitié, ce qui est un gain de temps appréciable lors de la résolution de grands problèmes.

5.4.4 Courbure, géodésiques et moindres carrés

Participants : Guy Chavent, J. Charles Gilbert, Paul Armand.

De nombreux algorithmes de moindres carrés pour la minimisation de $f(x) = \|F(x)\|^2$ passent d'un itéré x au suivant en effectuant une recherche unidimensionnelle dans une direction y proposée par l'algorithme. Nous proposons deux nouveaux concepts pour tenter d'améliorer cette étape algorithmique, basés tous deux sur la prise en compte des informations sur la géométrie du chemin et de la variété image que l'on peut extraire de la connaissance de $F''(x)(y, y)$:

pas de courbure : la connaissance de la courbure maximum sur le chemin $t \rightarrow F(x + ty)$ permet de déterminer simplement un pas $t_{courbure}$ qui garantisse que l'on n'a pas dépassé le premier point stationnaire, et donne une décroissance garantie du critère.

déplacement géodésique : lorsque le jacobien de F est disponible, le remplacement de la recherche linéaire par une recherche le long d'une géodésique approchée permet d'améliorer la décroissance garantie par le pas $t_{courbure}$.

Les premiers résultats numériques (stage de Yves Laroque, Université Paris-Dauphine) montrent que le remplacement, dans une méthode de Gauss-Newton, d'une recherche linéaire de type Armijo par un déplacement géodésique associé à un pas de courbure donne un algorithme très robuste en présence de fortes non-linéarités. Ces travaux seront présentés au congrès 4icipe à Rio en Mai prochain.

5.5 Développement de codes d'optimisation

5.5.1 OPINeL : un code d'optimisation de problèmes non linéaires par points intérieurs et recherche linéaire

Participants : Antonio Fuduli, J. Charles Gilbert.

Nous avons continué de peaufiner le code d'optimisation OPINeL [15, 14], code généraliste pouvant prendre en compte contraintes d'égalité et d'inégalité, fondé sur une approche par points intérieurs. Une version opérationnelle devrait être disponible au début 2002.

Cette année nous avons introduit une technique permettant de traiter les problèmes avec contraintes d'égalité quasi-singulières (dont la jacobienne a des valeurs singulières presque nulles). Le principe, dérivé des méthodes à régions de confiance, est d'imposer que la recherche linéaire rebrousse chemin en passant par le point de Cauchy associé aux contraintes. Cette modification a apporté une amélioration notable des performances du code dans les cas difficiles. L'extension de cette approche aux inégalités est à l'étude.

5.5.2 M4IP2 : un code d'optimisation de problèmes non linéaires par points intérieurs et régions de confiance

Participants : J. Charles Gilbert, Xavier Jonsson.

Le code M4IP2 implémente un algorithme de points intérieurs utilisant une technique de Programmation Quadratique Successive comme outil interne, globalisée par l'utilisation des régions de confiance. L'approche algorithmique étend celle de Byrd et Omojokun au cas où le problème présente aussi des contraintes d'inégalité. On utilise une approche par points intérieurs. La convergence globale est étudiée dans [BGN00], et l'implémentation de ce code est étudiée dans [2]. M4IP2 consiste en une programmation mixte MATLAB-FORTRAN, afin d'obtenir une solution intermédiaire et exploratoire en vue d'une implémentation future (prévue courant 2002) dans un langage de haut niveau tel que FORTRAN 90. Ce code devrait être intégré à la librairie MODULOPT de l'INRIA.

[BGN00] R. BYRD, J. GILBERT, J. NOCEDAL, « A trust region method based on interior point techniques for nonlinear programming », *Mathematical Programming* 89, 2000, p. 149–185.

Ce code a été développé et testé autour d'une grande collection de problèmes, de nature à la fois industrielle et académique. La grande variété des problèmes abordés a permis l'étude et le développement de méthodes d'algèbre linéaire (à la fois dense et creuse) utilisées dans la résolution de sous-problèmes propres aux méthodes à région de confiance. Des méthodes spécifiques combinant des approches directes (tels que des factorisations LU particulières) et des approches itératives ont été développées dans le but de traiter des problèmes de grande taille tels que ceux de la commande optimale et de l'optimisation de forme. Le code M4IP2 se distingue aussi par l'utilisation d'un gradient conjugué préconditionné dynamiquement par une méthode de quasi-newton. Cette approche est utilisée pour aborder des problèmes pratiques où le mauvais conditionnement du problème est fréquent.

6 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

6.1 Problèmes inverses en optométrie

Participants : Guy Chavent, François Clément, Philippe Alkhoury.

Le contrat avec la société Auxitrol, spécialisée en métrologie avionique et spatiale, portant sur l'estimation des profils de température et des concentrations au sein d'un jet de gaz à partir de mesures spectrales du rayonnement, s'est achevée en Mai par une inversion de données réelles, qui a été validée par des mesures expérimentales de température. Ces travaux, en collaboration avec P. Hervé (Université de Nanterre à Ville d'Avray) rentrent dans le cadre de la thèse de P. Alkhoury.

Une nouvelle étude a commencé cette année avec l'établissement de Gramat de la DGA. Il s'agit ici d'inverser des données optométriques recueillies lors de la détonation du nitrométhane, afin de mieux comprendre le phénomène. La contribution de l'Inria porte sur la réécriture mathématique des équations d'état, en particulier une paramétrisation des températures par une équation hyperbolique du premier ordre non linéaire, qui permettra de limiter fortement le nombre de paramètres inconnus du modèle. Ces travaux viennent en appui de la thèse de physique de V. Bouyer, préparée sous la direction de P. Hervé.

6.2 Transport de radionucléides autour d'un site de stockage profond

Participants : Jérôme Jaffré, Jean Roberts⁹, Vincent Martin.

La thèse de Vincent Martin, dirigée par Jean Roberts, est soutenue par l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs). Son sujet porte sur l'utilisation de méthodes de décomposition de domaines en espace et en temps pour la simulation de l'écoulement et du transport de contaminants à grande échelle avec une source de petite dimension.

⁹Projet Ondes

6.3 Conception de verres optiques progressifs

Participants : J. Charles Gilbert, Xavier Jonsson.

Notre travail porte sur le développement et l'amélioration des techniques numériques pour la conception de verres optiques progressifs. Nous nous intéressons aussi bien à la modélisation des problèmes d'optique optique exprimés sous forme de problèmes d'optimisation, qu'aux algorithmes d'optimisation numérique résolvant ces problèmes. Ce travail a été proposé par ESSILOR (Saint-Maur-des-Fossés).

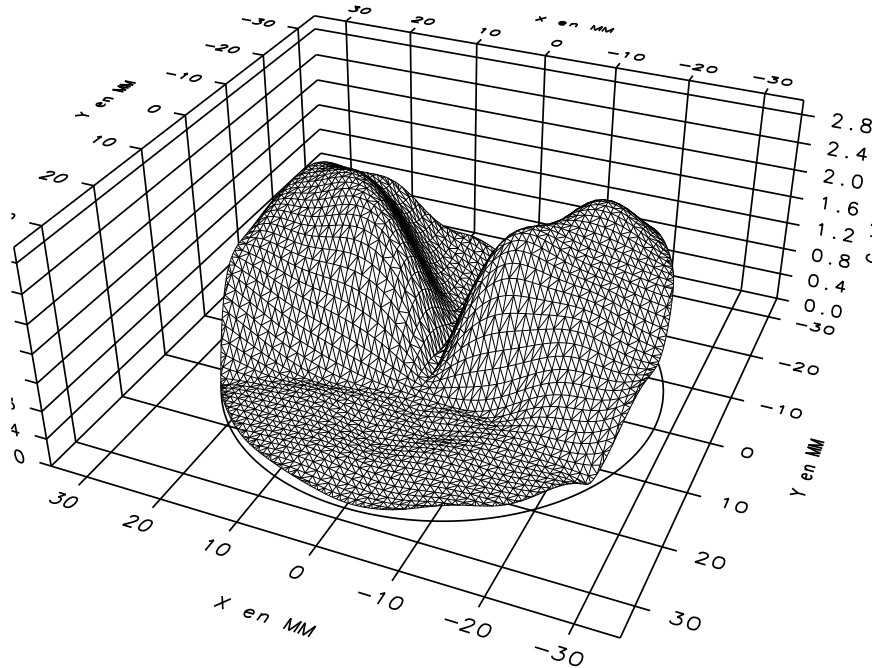


FIG. 3 – Carte d'asphérité locale d'un verre progressif

Les caractéristiques optiques et géométriques des verres progressifs en font un cas rare en optique de précision, où les dioptries sont en général des surfaces de révolution. Ceci nécessite de modéliser les verres progressifs au moyen de représentations polynomiales adaptées nécessitant un grand nombre de paramètres. Le calcul de ces paramètres se fait par des outils d'optimisation adéquats. L'introduction de contraintes dans la définition du problème de l'optimisation d'un verre progressif permet un contrôle rigoureux des propriétés du verre dès la phase de conception. Dans ce cadre, les contraintes sont naturellement conçues comme des tolérances de nature optique ou physiologique. On demande par exemple que les variations de certaines courbures ne dépassent pas un seuil fixé. La figure 3 caractérise l'asphérité (différence entre les courbures locales max et min) d'une surface obtenue après une optimisation sous contraintes. La partie frontale relativement plate de cette nappe 3D correspond à la zone de vision de loin de la surface progressive. Dans cette zone la surface doit être sphérique. Les deux « monticules » latéraux correspondent aux zones temporale et nasale. On tente de confiner le plus possible

l'asphérité de la surface dans ces zones latérales, car elles sont en général moins visitées par l'œil que les zones centrales.

L'introduction de contraintes rend aussi possible un partage de tolérances entre la conception amont et la fabrication aval des verres. Ces exigences (fréquentes dans un cadre industriel) ne peuvent qu'être difficilement accessibles avec des outils d'optimisation sans contrainte, comme la méthode des moindres carrés non linéaires amortis classiquement utilisée dans le domaine de la conception des systèmes optiques. La nature variée et difficile des problèmes d'optique ophthalmique demande donc le développement d'outils généralistes, efficaces et robustes.

6.4 Traitement numérique des profils d'indice dans les fibres optiques

Participant : J. Charles Gilbert.

Les propriétés d'une fibre optique cylindrique dépendent de l'indice de réfraction des différentes couches de matériaux constituant son cœur. La détermination du profil d'indice en fonction du rayon, peut se faire de manière optimale en fonction des propriétés recherchées de la fibre. Nous intervenons de manière ponctuelle dans ce travail entrepris par Alcatel Fibres Optiques : action de conseil et mise à disposition de codes numériques (collaboration avec P. Sillard et F. Beaumont).

6.5 Mise au point de moteurs thermiques de voiture

Participants : Paul Armand, J. Charles Gilbert.

L'injection électronique permet de régler finement un moteur thermique en l'adaptant aux conditions de fonctionnement (charge et régime du moteur). Il s'agit le plus souvent de minimiser sa consommation tout en respectant diverses contraintes de pollution. Ce réglage demande une connaissance du moteur qui ne peut être pour l'instant que statistique : le moteur passe au banc d'essai et sa réponse à diverses sollicitations est enregistrée. Cette opération demande de nombreux jours d'expérimentation, coûteux en mobilisation humaine et matérielle.

Une approche combinant optimisation et modélisation, permettant de réduire le temps de mise au point du moteur, est en cours d'étude chez Renault (Y. Tourbier). Nous intervenons dans cette étude par des actions de conseil en optimisation et des essais de méthodes d'optimisation (en particulier le code OPINEL, voir section 5.5.1).

6.6 Tomographie sismique

Participant : J. Charles Gilbert.

La tomographie sismique est une technique d'inversion sismique qui permet de retrouver la structure du sous-sol (position des réflecteurs et vitesses de propagation des ondes), lorsqu'il est raisonnable de supposer que les ondes se déplacent le long de rayons, éventuellement incurvés (approximation haute fréquence de l'équation des ondes). La reconstitution se fait à partir de la mesure des temps de trajet.

Cette année, nous avons commencé une collaboration avec F. Delbos (en thèse à l'IFP), R. Masson (IFP), D. Sinoquet (IFP) et R. Glowinski (Université de Houston) dans le but d'améliorer les méthodes d'optimisation en tomographie sismique. On cherche à pouvoir prendre en compte des contraintes d'inégalité exprimant des informations sur la structure du sous-sol provenant d'autres sources de connaissance. Jusqu'à présent l'effort a surtout été porté sur l'optimisation sans contrainte : introduction de régions de confiance (de manière à rendre l'algorithme gauss-newtonien plus robuste), amélioration du préconditionnement et contrôle de leur singularité éventuelle (dans les cas réels très mal posés). Cela a permis de pouvoir résoudre automatiquement des problèmes qui étaient auparavant insolubles sans intervention manuelle.

6.7 Aéroacoustique

Participants : Patrick Joly (projet Ondes), Michel Kern.

Notre travail est une contribution à l'étude de la réduction de bruit de jet en aéroacoustique, dans le cadre d'une convention de recherche avec Dassault Aviation. L'approximation de Lighthill permet de se ramener au cas d'une simulation acoustique dans un champ de vitesse calculé au préalable par un code de mécanique des fluides. Nous avons utilisé pour cela le code parallèle écrit par P. Havé sous la direction de M. Kern.

7 Actions régionales, nationales et internationales

7.1 Actions nationales

Le projet Estime participe au PNRH/INSU (Programme National de Recherche en Hydrogéologie de l'Institut National des Sciences de l'Univers) intitulé « Transports Complexes en Milieux Poreux et Ressources en Eau ».

En particulier une collaboration suivie existe avec Ph. Ackerer et R. Mosé de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg.

7.2 Relations bilatérales internationales

J.Ch. Gilbert a poursuivi sa collaboration avec A. Fuduli de l'université de Lecce (Italie), sur le développement du code d'optimisation OPINEL (voir la section 5.5.1). Dans ce cadre, il a fait deux séjours à l'université de Calabre à Cosenza (Italie), sur invitations du Prof. M. Gaudio.

J. Jaffré est co-responsable, avec M. Jaoua, professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisie et directeur du laboratoire LAMSIN, de deux projets de coopération : le projet CMCU « Identification, optimisation et problèmes inverses : applications industrielles et environnementales » et le projet STIC Inria-Université Tunis 2 « Appui à la formation doctorale en mathématiques appliquées ». Ces relations étroites se concrétisent par la création en 2001 d'une équipe associée entre le projet Estime et le Lamsin.

J. Jaffré est co-responsable avec Yuri Vassilievski, de l'Institut de Mathématiques Numériques de l'Académie des Sciences de Russie, du projet de l'Institut Liapunov intitulé « Simulation numérique pour un projet de stockage souterrain ».

8 Diffusion de résultats

8.1 Animation de la communauté scientifique

- G. Chavent est éditeur des journaux *Computational and Applied Mathematics* (Birkhäuser) et *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems* (VSP).
G. Chavent est aussi membre du conseil scientifique de la Division Mathématiques Appliquées de l'Université Technologique de Compiègne.
- J. Jaffré est membre du comité éditorial du journal *Computational Geosciences*.
Par ailleurs il co-organise avec Mohamed Jaoua le colloque Picof02 (2nd Conference on Inverse Problems, Control and Shape Optimization), Tunis, Tunisie, 10-12 avril 2002.
- M. Kern est l'organisateur du Colloquium de Rocquencourt.
M. Kern est secrétaire du GAMNI (Groupe pour l'Avancement des Méthodes Numériques de l'Ingénieur), un groupe de la SMAI.

8.2 Enseignement universitaire

- J.-Ch. Gilbert : cours à l'université Panthéon-Sorbonne (Paris I), DEA Modélisation et Méthodes Mathématiques en Économie : *Méthodes newtoniennes en optimisation avec contraintes*, 21 h., J.Ch. Gilbert.
- Jérôme Jaffré : cours à l'université Paris-Dauphine, DESS Mathématiques de la Décision, Analyse Numérique, 18 h.
Aussi cours à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), DEA Mathématiques Appliquées, Volumes finis et Eléments finis mixtes, 20 h, 28 mai-1er juin.

8.3 Autres enseignements

- École des Mines de Paris, 1^{re} année : *Calcul différentiel*, 22 h., F. Clément.
- École des Mines de Paris, 1^{re} année : *Calcul intégral*, 26 h., F. Clément.
- École des Mines de Paris, 2^e année : *Analyse numérique* (J. Henry), M. Kern est chargé de cours.
- École Nationale de Techniques Avancées (ENSTA). 2^e année : *Optimisation différentiable : théorie et algorithmes*, 42 h., J.Ch. Gilbert. 3^e année : *Méthodes newtoniennes en optimisation avec contraintes*, 21 h., J.Ch. Gilbert.
- Pôle universitaire Léonard de Vinci, École Supérieure d'Ingénieurs Léonard de Vinci, 5^e année : *Problèmes inverses*, 40 h, M. Kern.
- Pôle universitaire Léonard de Vinci, formation de post-gradués en Calcul Scientifique : *Problèmes inverses*, 15 h, M. Kern.
- Lycée Lakanal (Sceaux), Mathématiques supérieures : *TP d'informatique, initiation au calcul formel*, 44 h., C. Leleu.
- Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Licence de mathématiques *Initiation à Unix*, 8 h., C. Leleu.
- Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, DEUG S.M. 2^e année : *Géométrie, calcul différentiel, espaces euclidiens*, 55h., V. Martin.

- Université de Paris Dauphine, DEUG G.E.A. 1^{re} année : *Calcul différentiel et optimisation*, 42 h., V. Martin.
- Journées de formation de la Société ARTELYS intitulées « *Programmation non linéaire : modèles et algorithmes* », 4 h., J.Ch. Gilbert.

8.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- G. Chavent, *Indicateurs de raffinement pour une paramétrisation adaptative*, 13^{ème} Séminaire de Mécanique des Fluides Numériques, INSTN Saclay, 30 Janvier–01 Février.
- G. Chavent and K.Kunisch, *2D Output Least Squares Identifiability for the diffusion coefficient from a distributed measurement*, Inverse Problems in Engineering Symposium, Texas A&M University, College Station, Texas USA, 14–16 Juin.
- G.Chavent, *Méthodes Géométriques pour l'analyse des problèmes inverses non-linéaires*, Congrès SMAI 2001, Club Med de Pompadour, 28 Mai–1er Juin.
- G.Chavent and H. Benameur, *Refinement and coarsening indicators for an interactive determination of piecewise constant parameters* Fifth SIAM Conference on Control and its Applications, San Diego USA, 10–15 Juillet.
- F. Clément, *L'approche MBTT : une formulation en temps pour l'inversion de données de sismique réflexion*, Séminaire du Laboratoire ACSIOM, Université de Montpellier 2, 11 décembre.
- J.M. Cognet, *Inversion par forme d'onde de données sismiques contenant des multiples*, 1^{er} Congrès National de Mathématiques Appliquées et Industrielles, Pompadour, 28 mai–1^{er} juin.
- J.Ch. Gilbert : *Using quasi-Newton Techniques in Interior Point Algorithms*, intervention invitée à la conférence « High Performance Algorithms and Software for Nonlinear Optimization », Erice, Italie, 30 juin – 8 juillet.
- J. Jaffré : *On locally conservative methods for a double porosity model*, 6th SIAM Conference on Mathematical and Computational Issues in Geosciences, Boulder, Colorado, Etats Unis, 11–14 juin (travail joint avec Jean Roberts).
- J. Jaffré : invitation du Prof. M. Wheeler au Center for Subsurface Modeling, TICAM, university of Texas at Austin, 25 juin –7 juillet.
- J. Jaffré : invitations du Prof. R.E. Ewing à Institute for Scientific Computation, Texas A&M, College Station, Texas, Etats-Unis, et du Prof. Yuri Kuznetsov au département de mathématiques de l'université de Houston, Houston, Texas, Etats-Unis.
- M. Kern, *Simulation of Acoustic Waves using Higher Order Finite Elements*, 6th SIAM Conference on Mathematical and Computational Issues in Geosciences, Boulder, Colorado, Etats Unis, 11–14 juin.
- M. Kern, *Parallel Simulation of Acoustic Waves using Higher Order Finite Elements*, séminaire à l'École d'été CEMRACS, Marseille, 23 juillet–31 août.
- C. Leleu, *Waveform inversion for the estimation of acquisition parameters from 3-D VHR marine data*, 71st Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, San Antonio (États-Unis), 9–14 septembre.
- C. Leleu, *Sismique 3D et estimation du relief des fonds marins*, Colloquium junior, Inria, Rocquencourt, 11 octobre.

- V. Martin, *Flow and transport of contaminants in a porous medium with faults*, 6th SIAM Conference on Mathematical and Computational Issues in Geosciences, Boulder (CO, Etats Unis), 11–14 juin (travail joint avec J. Jaffré et J. Roberts).
- V. Martin, participation à l'Ecole d'été CEMRACS, thème : *problèmes multi-échelles*, Marseille, 23 juillet–31 août.

8.5 Conseil en entreprises

- G. Chavent, F. Clément, J.-Ch. Gilbert et M. Kern sont intervenus en tant que conseillers auprès de l'IFP pour deux problèmes de sismique réflexion (continuation en profondeur de données de surface et approximation paraxiale 3D).
- J.Ch. Gilbert a eu des actions de conseil auprès d'Alcatel Fibres Optiques et de Renault (avec P. Armand dans ce dernier cas).
- J. Jaffré est membre du conseil scientifique de l'Andra (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs).
- M. Kern est conseiller à l'Andra (Agence Nationale pour le Traitement des Déchets Radioactifs).

9 Bibliographie

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [1] J.-M. COGNET, *Inversion sismique : identification du signal source et modélisation des réflexions multiples*, thèse de doctorat, Université de Paris 9, avril 2001.
- [2] X. JONSSON, *Méthodes de Points Intérieurs et de Régions de Confiance en Optimisation Non Linéaire – Application à la Conception de Verres Ophthalmiques Progressifs*, thèse de doctorat, Université Paris VI, 2001, à paraître.
- [3] C. LELEU, *Sismique Très Haute Résolution tri-dimensionnelle : identification de la position du dispositif d'acquisition par une reformulation en temps*, thèse de doctorat, Université Paris 9, septembre 2001.

Articles et chapitres de livre

- [4] F. CLÉMENT, G. CHAVENT, S. GÓMEZ, « Migration-based travelttime waveform inversion of 2-D simple structures : A synthetic example », *Geophysics* 66, 2001, p. 845–860.
- [5] J. GILBERT, C. GONZAGA, E. KARAS, « Examples of ill-behaved central paths in convex optimization », *Mathematical Programming*, 2001, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [6] J.-M. COGNET, Y.-H. DE ROECK, F. CLÉMENT, G. CHAVENT, « Inversion par forme d'onde de données sismiques contenant des multiples », in : *Actes du 1^{er} Congrès National de Mathématiques Appliquées et Industrielles*, SMAI, p. 222, 2001.
- [7] Y.-H. DE ROECK, J.-M. COGNET, G. CHAVENT, F. CLÉMENT, « Free surface multiple removing via iterative prestack migration », in : *63rd Mtg. Eur. Assoc. of Geoscient. and Eng., Extended Abstracts*, 2001.

- [8] C. LELEU, Y.-H. DE ROECK, F. CLÉMENT, G. CHAVENT, « Waveform inversion for the estimation of acquisition parameters from 3-D VHR marine data », *in : 71st Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 2001.

Rapports de recherche et publications internes

- [9] ADIMURTHI, V. GOWDA, J. JAFFRÉ, « Godunov methods for conservation laws with a flux function discontinuous in space », *Rapport de Recherche n°4279*, INRIA, 2001, soumis à publication, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4279.html>.
- [10] C. ALBOIN, J. JAFFRÉ, P. JOLY, J. ROBERTS, C. SERRES, « A comparison of methods for calculating the matrix block source term in a double porosity model », *Rapport de Recherche n°4280*, INRIA, 2001, soumis à publication, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4280.html>.
- [11] C. ALBOIN, J. JAFFRÉ, P. JOLY, J. ROBERTS, « On a convolution operator arising in a double porosity model », *Rapport de Recherche n°4126*, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4126.html>.
- [12] C. ALBOIN, J. JAFFRÉ, J. ROBERTS, C. SERRES, « Modeling fractures as interfaces for flow and transport in porous media », *Rapport de recherche*, INRIA, décembre 2001, soumis à publication.
- [13] H. BEN AMEUR, G. CHAVENT, J. JAFFRÉ, « Refinement and coarsening indicators for adaptive parametrization », *Rapport de Recherche n°4292*, INRIA, 2001, soumis à publication, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4292.html>.
- [14] L. CHAUVIER, A. FUDULI, J.CH. GILBERT, « A truncated SQP algorithm for solving nonconvex equality constrained optimization problems », *rapport de recherche n°4346*, Inria-Rocquencourt, BP 105, 78153 Le Chesnay, France, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4346.html>.
- [15] A. FUDULI, J.CH. GILBERT, « OPINeL : a truncated Newton interior-point algorithm for nonlinear optimization », *rapport de recherche*, Inria-Rocquencourt, BP 105, 78153 Le Chesnay, France, 2001, à paraître.
- [16] P. HAVÉ, M. KERN, C. LEMUET, « Résolution numérique de l'équation des ondes par une méthode d'éléments finis d'ordre élevé sur calculateur parallèle », *rapport de contrat*, INRIA, 2001.
- [17] J.CH. GILBERT, X. JONSSON, « BFGS preconditioning of a trust region algorithm for unconstrained optimization », *Rapport de recherche*, Inria-Rocquencourt, BP 105, 78153 Le Chesnay, France, 2001, à paraître.
- [18] R. MOREL, « Décomposition de domaine pour l'étude des écoulements en milieux poreux », *Rapport de stage de DESS*, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 2001.