

Projet ESTIME

Estimation de paramètres et modélisation en milieu hétérogène

Rocquencourt

THÈME 4B



*Rapport
d'Activité*

2000

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.1	Problèmes inverses	5
3.1.1	D'où proviennent les problèmes inverses	6
3.1.2	Difficultés des problèmes inverses	6
3.2	Méthodes numériques pour les équations aux dérivées partielles	7
3.2.1	Éléments finis et volumes finis	7
3.2.2	Décomposition de domaines	8
3.2.3	Calcul parallèle	8
3.3	Méthodes numériques en optimisation	9
3.3.1	Algorithmes de points intérieurs non-linéaires	10
3.3.2	Autres méthodes numériques	10
4	Domaines d'applications	11
4.1	Inversion sismique	11
4.2	Imagerie cérébrale	13
4.3	Écoulement et transport en milieu poreux pour les problèmes d'environnement	13
4.3.1	Transport de radionucléides autour d'un site de stockage profond	14
4.3.2	Déplacements diphasiques	15
4.3.3	Identification de conductivités hydrauliques dans un aquifère	15
4.4	Quelques applications de l'optimisation	15
5	Résultats nouveaux	16
5.1	Écoulements en milieu poreux	16
5.1.1	Écoulements en milieu fracturé	17
5.1.2	Transport de contaminants	17
5.1.3	Paramétrisation Interactive	17
5.1.4	Identifiabilité du coefficient de diffusion	17
5.2	Inversion sismique	18
5.3	Méthodes numériques pour la simulation acoustique	19
5.4	Méthodes numériques pour l'imagerie cérébrale	21
5.5	Méthodes d'optimisation numérique	21
5.5.1	Étude de chemins centraux en optimisation convexe	21
5.5.2	Méthodes de quasi-Newton et de points intérieurs	21
5.6	Développement de codes d'optimisation	22
5.6.1	OPINeL : un code d'optimisation de problèmes non linéaires par points intérieurs	22
5.6.2	TRIP : Implémentation d'un optimiseur non linéaire avec contraintes	22
5.6.3	Autres codes d'optimisation	23

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	24
6.3 Conception optimale de verres ophtalmiques progressifs	24
6.4 Optimisation de formes en aéronautique	25
6.5 Traitement numérique des profils d'indice dans les fibres optiques	25
6.6 Mise au point de moteurs thermiques de voiture	25
7 Actions régionales, nationales et internationales	26
7.1 Actions nationales	26
7.2 Relations bilatérales internationales	26
8 Diffusion de résultats	26
8.1 Animation de la communauté scientifique	26
8.2 Enseignement universitaire	27
8.3 Autres enseignements	27
8.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations	27
8.5 Diffusion de produits	29
8.6 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 de Paris 9]

Collaborateurs extérieurs

Yann-Hervé De Roeck [Inria-Rennes, puis Ifremer-Brest]

Paul Armand [Université de Limoges]

Chercheurs invités

Antonio Fuduli [Università di Lecce, Italie, financement de l'ARC OPINeL (du 1/1 au 28/2 et du 2/7 au 22/7)]

Clovis Gonzaga [Federal University of Santa Catarina, Brésil (du 16/10 au 15/11)]

Magne Espedal [Université de Bergen, Norvège (du 10/09 au 6/10)]

Doctorants

Clarisse Alboin [bourse Inria, Université de Paris 9, jusqu'au 31/1]

Philippe Al Khoury [bourse Cifre Auxitrol, Universités de Paris 9 et 10 (à partir du 6/11)]

Jean-Marc Cognet [bourse Inria, Université de Paris 9]

Xavier Jonsson [bourse Cifre Essilor, Université de Paris 6]

Elizabeth Karas [Université Santa Catarina, Florianópolis, Brésil (jusqu'au 31/3)]

Claire Leleu [bourse Ifremer, Université de Paris 9]

Vincent Martin [bourse Andra, Université de Paris 9 (à partir du 1/11)]

Xuwen Wang [bourse Inria, Université de Paris 11]

Stagiaires

François Akoa [DEA, Université de Paris 1 (du 1/5 au 30/9)]

Sarah Benbaba [DEA, Université de Paris 9 (du 15/6 au 30/9)]

Pascal Havé [DEA, Université de Paris 6 (du 15/4 au 30/10)]

Vincent Martin [DEA, Université de Lyon et stage de fin d'études, Ecole Centrale de Lyon (du 15/4 au 15/8)]

2 Présentation et objectifs généraux

La modélisation numérique des milieux hétérogènes nécessite la mise en œuvre d'un certain nombre de méthodes spécifiques.

Le premier exemple 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:

- l'inversion sismique,
- la modélisation numérique des écoulements de fluides en milieu poreux, avec applications aux problèmes d'environnement ou à la simulation de réservoirs pétroliers,
- la modélisation numérique en neutronique,
- diverses applications de l'optimisation numérique, dont voici quelques exemples récents : commande optimale d'engins immergés tractés par un câble, conception optimale de verres ophtalmiques, traitement numérique des profils d'indice dans les fibres optiques, optimisation de formes aérodynamiques, mise au point de moteurs thermiques pour l'automobile.

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.

Une autre caractéristique de beaucoup de ces problèmes, notamment en estimation de paramètres, est d'aboutir à une formulation sous forme de problèmes d'optimisation : on cherche à minimiser un critère sous diverses contraintes s'exprimant le plus souvent sous la forme de relations (égalités et inégalités) que doivent vérifier les variables à optimiser. Le projet cherche donc aussi à développer les techniques d'optimisation numérique pour les problèmes de grande taille. Sur ces questions, le projet collabore avec le projet Numopt (UR Rhône-Alpes), notamment dans le développement de la bibliothèque MODULOPT.

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 Odyssée 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, $\vec{u} = -K \text{grad}P$, 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 $x \in \mathbf{R}^n \mapsto f(x) \in \mathbf{R}$, 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

$c_E : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^{m_E}$ et $c_I : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^{m_I}$. 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.

L'action coopérative OPINeL lancée en 1997 et qui a pris fin en août 2000 est liée à ce thème de recherche. Elle a eu pour but d'étudier et de contribuer à l'amélioration des méthodes de PI pour résoudre efficacement les problèmes d'optimisation non-linéaires généraux et de tester les algorithmes proposés sur diverses applications (cf. 5.6.1).

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, Michel Kern, Jean-Marc Cognet, 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 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 Ecoulement 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*

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

2. Projet Ondes

[BCJ99] H. BEN AMEUR, G. CHAVENT, J. JAFFRÉ, « Raffinement et déraffinement 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.

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 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 Akoa, Paul Armand, Alain Dervieux (projet Tropics), 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 :

- *La conception optimale de verres ophtalmiques progressifs.* Pour concevoir des verres ophtalmiques progressifs destinés à corriger la presbytie, on est amené à déterminer les surfaces du verre de manière à obtenir des propriétés de correction de vision adaptées à un porteur donné (puissance du verre pour la vision de près et de loin, correction de l'astigmatisme, etc. . .), tout en minimisant certaines aberrations dues entre autres à l'épaisseur du verre et à l'indice du matériau. Cela conduit à un problème de moindres carrés non linéaire où l'on cherche à minimiser les écarts entre des grandeurs de nature géométrique ou optique évaluées en certains points de la surface progressive, et celles souhaitées pour le verre optimisé. Ce travail a été proposé par Essilor (Saint-Maur-des-Fossés). Pour plus d'information, voir la section 6.3.
- *Optimisation de formes en aéronautique.* Voir section 6.4.
- *Traitement numérique des profils d'indice dans les fibres optiques.* Voir section 6.5.
- *Mise au point de moteurs thermiques de voiture.* Voir section 6.6.

5 Résultats nouveaux

5.1 Ecoulements en milieu poreux

Participants : Clarisse Alboin, Guy Chavent, Hend Ben Ameer³, Magne Espedal⁴, Willem Hundsdorfer⁵, Jérôme Jaffré, Vincent Martin, Jean Roberts⁶, Xuewen Wang.

Mots clés : fractures, double porosité, décomposition de domaine, problème inverse.

3. Université de Bizerte, Tunisie

4. Université de Bergen, Norvège

5. CWI, Amsterdam, Pays-Bas

6. Projet Ondes

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. 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 [1] et l'ont étendu au cas où la fracture est remplacée par une barrière (faible perméabilité).

Par ailleurs pendant son stage de DEA [20], Vincent Martin a montré comment utiliser la méthode des domaines fictifs comme une alternative à la méthode de décomposition de domaine telle qu'elle avait été présentée dans [1].

5.1.2 Transport de contaminants

Le transport de contaminants dans un milieu poreux peut se modéliser par une équation de convection-réaction. Une collaboration avec Willem Hundsdorfer (CWI, Amsterdam, Pays-Bas) a permis d'étudier, en les comparant, différents schémas numériques basés sur des éléments finis discontinus [18].

5.1.3 Paramétrisation Interactive

Le choix de la paramétrisation de la conductibilité hydraulique (par exemple constante sur des domaines à déterminer) est un point clé pour la modélisation par approche inverse des écoulements dans le sous-sol. Les indicateurs de raffinements, introduits par G. Chavent, ont pour objectif de permettre d'ajouter, au fur et à mesure de l'optimisation, les degrés de liberté du paramètre qui doivent permettre la meilleure décroissance du critère des moindres carrés sur les données. Cette approche interactive, développée par H. Ben Ameer dans sa thèse en 1999 pour le cas d'école d'une observation complète de la piézométrie, a été testée cette année dans le cas réaliste d'observations partielles tant en espace qu'en temps. On arrive ainsi à obtenir une conductibilité hydraulique constante sur un petit nombre de zones (non connues à l'avance) qui explique correctement la piézométrie mesurée, bien que celle-ci ait été générée par une conductibilité plus complexe. Les résultats ont été présentés dans différentes conférences.

5.1.4 Identifiabilité du coefficient de diffusion

L'estimation des perméabilités ou des transmissivités dans un milieu poreux se ramène, d'un point de vue mathématique, à l'inversion de l'application non-linéaire "coefficient de diffusion" \rightarrow "mesures de piézométrie au sens des moindres carrés". Il avait été observé numériquement que la non-linéarité et la sensibilité de cette application dépendaient fortement de l'échelle à laquelle le coefficient de diffusion était représenté, observations qui étaient à la base du succès des paramétrisations multi-échelles.

G. Chavent et K. Kunisch ont justifié et quantifié ces observations de façon rigoureuse [15] pour des problèmes stationnaires bidimensionnels avec observation complète. Ceci permet de mieux comprendre les difficultés rencontrées de façon récurrente dans la résolution de ce

problème, et suggère de nouvelles pistes pour stabiliser l'estimation du coefficient de diffusion. Une collaboration sur ces prolongements est commencée avec le Lamsin de l'Enit à Tunis.

5.2 Inversion sismique

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

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

J.-M. Cognet a poursuivi ses travaux de thèse sous la direction de G. Chavent, Y.-H. De Roeck et F. Clément. L'opérateur de modélisation par points diffractants "Born+Rais" a été étendu de façon à pouvoir modéliser les multiples du fond de l'eau. Ces derniers sont en effet les plus présents dans les données et il est possible de les prendre en compte en supposant connus la position du fond de l'eau β et un paramètre de réflexion α . Ces deux nouveaux paramètres devront être identifiés en première partie de l'inversion. Notons que l'identification de β pourra être obtenue en migrant ou en inversant les données avec la vitesse de l'eau. Des résultats de simulation avec ce nouvel opérateur ont été présentés aux conférences CANUM'2000 [9] et WAVES'2000 [10]. On souhaite maintenant faire de l'inversion de données sismiques avec cet opérateur de simulation qui reste efficace en terme de coût CPU ce qui permet de prendre en compte un nombre de tirs significatif.

C. Leleu a continué 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 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. Cette dernière étape de minimisation est en voie d'intégration dans le code principal réalisé en Fortran 90. Le traitement de données réelles est envisagé.

5.3 Méthodes numériques pour la simulation acoustique

Participants : Michel Kern, Pascal Havé.

Mots clés : élément fini, calcul parallèle.

Nous avons poursuivi les travaux sur l'utilisation de méthodes d'éléments finis d'ordre élevé pour résoudre l'équation des ondes. Le travail de Ch. Lemuet en 1999 avait montré le besoin d'utiliser (et de développer) des outils plus systématiques pour pouvoir traiter des problèmes 3D « significatifs ». En particulier, il est devenu indispensable de recourir au parallélisme. Lors de son stage de DEA, P. Havé a pu ainsi mettre au point un nouveau code de calcul beaucoup plus performant.

Ce code est écrit en C++, en utilisant toutes les ressources de la bibliothèque standard. Il permet une résolution parallèle de façon portable, grâce à MPI, et utilise l'outil standard pour décomposer les maillages *Metis* (de l'université du Minnesota). Il nous a permis de mener à bien des simulations de grande taille (plus de 3 millions de degrés de liberté). L'exemple de la figure 1 représente la diffraction d'une onde sphérique par une hétérogénéité cubique.

Les premiers résultats indiquent que, pour les calculs 3D, la situation est moins favorable qu'elle ne l'était pour le 2D^[CJT00]. Cela est du, au moins en partie, à la condition CFL du nouvel élément, qui semble extrêmement restrictive. Il reste à mener d'autres tests sur des temps très longs.

En utilisant une version du compilateur C++ fournie par la société Kuck and Associates, nous avons pu tester ce code sur de grosses configurations sur le Cray T3E de l'IDRIS. Nous présentons ici des premiers résultats d'accélération sur un problème de taille fixée. Sans être spectaculaires, les résultats sont encourageants.

Nbre CPUs	Temps	Accélération	Efficacité
64	645	64.0	1.00
80	611	67.6	0.84
96	501	82.4	0.85
112	438	94.2	0.84
128	407	101.4	0.79

TAB. 1 – Accélération et efficacité à taille fixée

Ces travaux doivent être poursuivis par la prise en compte de conditions aux limites absorbantes, et par l'étude de la condition de stabilité des nouveaux éléments finis.

[CJT00] G. COHEN, P. JOLY, N. TORDJMAN, «Higher Order Triangular Finite Elements with Mass Lumping for the Wave Equation. Part I : Construction», *SIAM J. Num. Anal.*, 2000, à paraître.

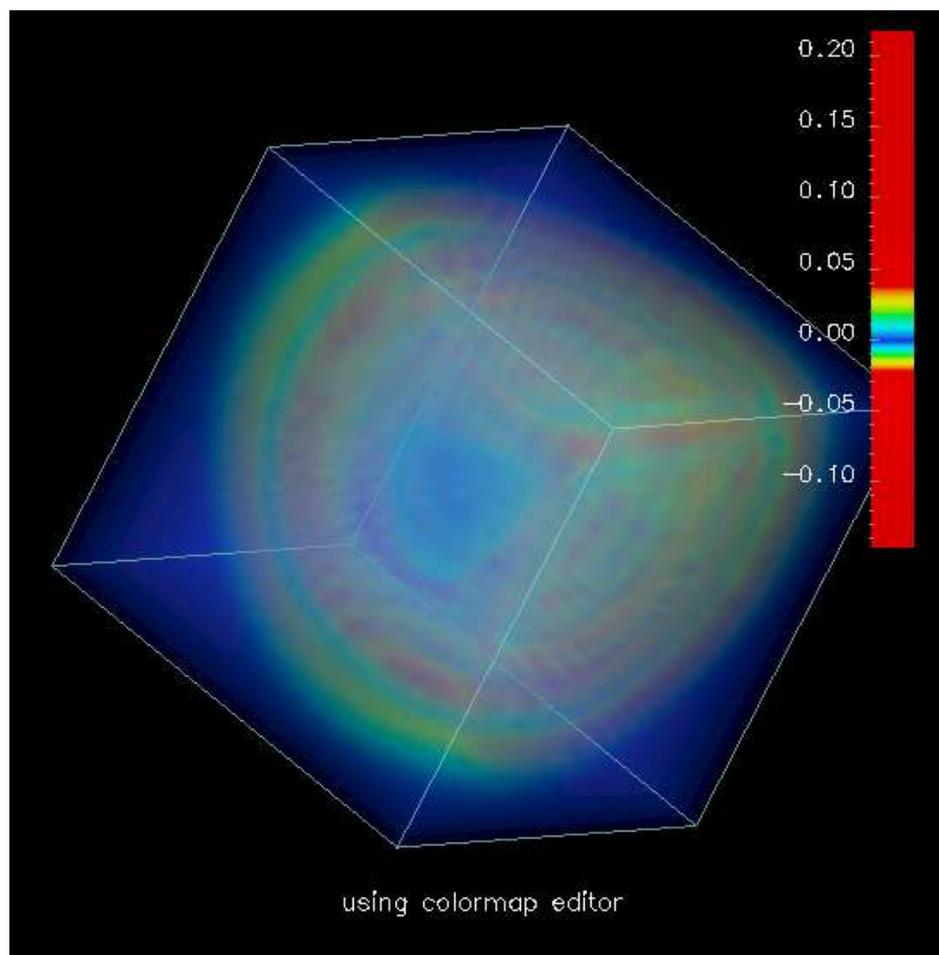


FIG. 1 – *Diffraction d'une onde acoustique par une inclusion*

5.4 Méthodes numériques pour l'imagerie cérébrale

Participants : Guy Chavent, François Clément, Renaud Keriven⁷, Jacques Henry⁸.

Le code de calcul développé au Cermics repose sur une approche surfacique pour laquelle la conductivité électrique à l'intérieur de la tête est constante par morceaux. L'activité électromagnétique du cerveau est alors modélisée par une équation elliptique pour le potentiel électrique et par la loi de Biot et Savart pour le champ magnétique. Le code ayant été validé sur des exemples simples, une étude portant sur l'analyse de sensibilité du problème direct et sur le choix de la paramétrisation a été entamée.

5.5 Méthodes d'optimisation numérique

5.5.1 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 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 [16], 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 un nombre infini de lacets venant s'accumuler sur un sous-ensemble de solutions (le chemin central ne converge donc pas dans ce cas). 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 pouvoir étendre les bons résultats de convergence des algorithmes de PI obtenus pour d'autres classes de problèmes.

5.5.2 Méthodes de quasi-Newton et de points intérieurs

Participants : Paul Armand, J. Charles Gilbert, Sophie Jan-Jégou.

Nous avons poursuivi l'étude d'algorithmes d'optimisation combinant l'approche par PI et les techniques de quasi-Newton [3, 14]. Les PI devraient permettre de résoudre plus facilement les problèmes avec un grand nombre de contraintes d'inégalité (nous n'avons pas encore fait d'étude numérique intensive permettant de conclure en ce sens). L'aspect quasi-newtonien de ces algorithmes leur permet de générer des suites avec une bonne vitesse de convergence, sans demander à l'utilisateur du code de calculer les dérivées secondes des fonctions définissant le problème.

Nous nous sommes concentrés cette année sur des algorithmes ne nécessitant pas la connaissance d'un premier itéré admissible (algorithmes dits "sans admissibilité"). L'admissibilité est

7. Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques, Informatique et Calcul Scientifique

8. Projet Ondes

forcée par une technique de pénalisation exacte. La convergence de l'algorithme a été démontrée, sous l'hypothèse que le paramètre de pénalisation restait borné au cours des itérations, une hypothèse que nous nous attachons à supprimer. L'étape suivante, consistera à faire l'étude asymptotique de l'algorithme, lorsque le paramètre de pénalisation tend vers zéro.

Une maquette en Matlab a été réalisée: le code QNIP.

5.6 Développement de codes d'optimisation

Deux codes d'optimisation de problèmes non linéaires sous contraintes d'égalité et d'inégalité non linéaires ont été mis au point cette année. Tous deux utilisent une approche par points intérieurs, mais la globalisation des algorithmes se fait différemment. Dans OPINeL, c'est la recherche linéaire qui assure la convergence des itérés, tandis que le code TRIP utilise des régions de confiance. Nous décrivons en section 5.6.3 les modifications apportées au code M2QN1 de Modulopt et un code en cours de réalisation.

5.6.1 OPINeL : un code d'optimisation de problèmes non linéaires par points intérieurs

Participants : Antonio Fuduli, J. Charles Gilbert.

Le code OPINeL implémente un algorithme de points intérieurs (voir section 3.3.1) pour la minimisation de fonctions sous contraintes d'égalité et d'inégalité. Il est écrit en Fortran 77. Le problème d'optimisation à résoudre peut être entièrement non linéaire (critère et contraintes), éventuellement non convexe. Le code s'attend à ce que les dérivées secondes des fonctions définissant le problème aient été calculées. La globalisation de l'algorithme (technique utilisée pour forcer la convergence) se fait par recherche linéaire.

OPINeL a été testé sur les problèmes de la collection CUTE et a, en général, donné de bons résultats. On sait que l'approche peut souffrir d'un effet d'emprisonnement des itérés dans des zones sans propriétés intéressantes. Ce phénomène, mis en évidence par Biegler et Wächter à la fin 1999, peut se produire en présence de contraintes non convexes, créant des pièges à itérés par non-connexité de ses ensembles de niveaux. Nous n'avons pas souvent rencontré ce phénomène, bien que l'on puisse toujours le créer artificiellement. Un remède est à l'étude.

OPINeL a été mis au point pour des problèmes de taille moyenne (matrices pleines), mais une version utilisant le caractère creux éventuel du problème est en cours de développement. Les premiers tests, sur des problèmes de commande optimale, ont été passés avec succès, bien que des réglages soient encore nécessaires. La version gérant la creusité utilise le solveur de système linéaire MA28 de I. Duff.

5.6.2 TRIP : Implémentation d'un optimiseur non linéaire avec contraintes

Participants : Xavier Jonsson, J. Charles Gilbert.

Tout comme OPINeL, le code TRIP (Trust Region Interior Points) implémente une méthode d'optimisation non linéaire utilisant une approche par points intérieurs, mais ici la convergence est globalisée par l'utilisation de régions de confiance. L'approche algorithmique

étend celle de Byrd et Omojokun au cas où le problème présente aussi des contraintes d'inégalité. La convergence globale est étudiée dans [5]. Cet algorithme a également été implémenté dans le code NITRO développé par R. Byrd, M. Hribar et J. Nocedal. On notera que l'approche par régions de confiance atténue l'effet d'emprisonnement des itérés décrit en section 5.6.1, dans le sens où l'algorithme assure la convergence des itérés vers des points qui sont au moins stationnaires pour une mesure d'admissibilité naturelle (à défaut d'être admissibles),

L'implémentation consiste en une programmation mixte Matlab–Fortran, afin d'obtenir une solution intermédiaire entre un outil purement académique et un outil industriel. Ce code devrait servir à terme au développement d'un code Fortran pour des problèmes de grande taille, intégré à la librairie Modulopt de l'INRIA.

Ce code a été développé et testé autour d'une grande collection de problèmes, de nature à la fois industrielle (conception optimale de verres ophtalmiques progressifs, commande optimale d'un engin immergé tracté par un câble, ...) et académique (collection CUTE). 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 régions de confiance. Le code TRIP se distingue principalement de NITRO, 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.

Une extension de ce code au cas de problèmes de commande optimale de grande taille sera envisagée par la suite.

5.6.3 Autres codes d'optimisation

Participants : Éliane Bécache (projet Ondes), J. Charles Gilbert, Gilles Scarella (projet Ondes).

Le code M2QN1 de Modulopt, développé par C. Lemaréchal et E. Panier, permet de minimiser des fonctions non linéaires sous contraintes de borne par un algorithme quasi-newtonien (seules les dérivées premières doivent être calculées), avec activation de contraintes. Ce code a été amélioré par l'introduction d'une mise à l'échelle initiale par le facteur d'Oren-Luenberger de la matrice qui sera ensuite mise à jour par la formule de BFGS. Les performances du code s'en trouvent souvent nettement améliorées.

G. Scarella, en collaboration avec E. Bécache et J. Ch. Gilbert, développe QPB, un code d'optimisation de fonctions quadratiques convexes sous contraintes de borne pour problèmes de grande taille avec structure creuse. L'approche utilisée allie l'algorithme du gradient projeté et l'activation de contraintes.

6 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

6.1 Problèmes inverses en optométrie

Participants : Guy Chavent, François Clément, Sarah Benbaba, Philippe Al khoury.

Il s'agit de l'estimation des profils de température et des concentrations au sein d'un jet de

gaz brulants à partir de mesures spectrales du rayonnement emis par ces gaz. Notre contribution porte sur la réécriture mathématique des équations d'état, et sur la méthodologie de résolution du problème inverse. Ces travaux se font en collaboration avec Philippe Hervé (université de Nanterre à Ville d'Avray). Ils concernent le stage de DEA de Sarah Benbaba, et la thèse de Philippe Alkhoury qui a commencé en octobre. L'interlocuteur industriel est la société Auxitrol, spécialisée en métrologie avionique et spatiale.

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

Participants : Jérôme Jaffré, Jean Roberts⁹, Vincent Martin.

La thèse de Vincent Martin 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.

6.3 Conception optimale de verres ophtalmiques progressifs

Participants : J. Charles Gilbert, Xavier Jonsson.

Notre travail porte sur le développement et l'amélioration des techniques numériques pour la conception optimale de verres ophtalmiques progressifs. Nous nous intéressons aussi bien à la modélisation des problèmes d'optique ophtalmique 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).

En simplifiant volontairement, un verre progressif doit restituer au porteur presbyte une vision correcte aussi bien en vision de près qu'en vision de loin. Une surface progressive est issue d'un travail de conception basé à la fois sur des concepts physiologiques et sur les propriétés optiques d'un verre. La géométrie d'une surface progressive assure un passage continu de la vision de près (bas du verre) à la vision de loin (haut du verre), et doit minimiser les aberrations optiques inévitablement générées lors de la réfraction de la lumière au travers du verre. La conception d'un verre progressif est donc un processus itératif par essai-erreur faisant intervenir de manière fondamentale l'optimisation numérique.

On veut pouvoir contrôler les propriétés obtenues lors de la phase d'optimisation. C'est ce qu'autorise l'ajout de contraintes à ces problèmes.

Par exemple dans le cadre de l'optimisation surfacique des verres progressifs on aimerait imposer en des points bien déterminés, les valeurs de certaines courbures déduites d'une approximation locale de la surface. Un problème, tout aussi important d'un point de vue industriel, est de contrôler l'épaisseur du verre optimisé. A la fois pour des raisons évidentes de résistance aux chocs, mais aussi pour des raisons esthétiques. Cela se traduit par des contraintes d'inégalité.

9. Projet Ondes

6.4 Optimisation de formes en aéronautique

Participants : François Akoa, Alain Dervieux (projet Tropics), J. Charles Gilbert.

La simulation de l'écoulement d'un fluide autour d'une aile d'avion ou de son fuselage fait appel à des techniques numériques complexes et variées : éléments/volumes finis, multi-grilles, parallélisation de codes et différentiation automatique. Lorsqu'il s'agit de déterminer la forme de l'aile de manière à optimiser ou simplement améliorer son comportement dans les différentes phases du vol (décollage, croisière, atterrissage), les techniques d'optimisation numérique entrent en jeu. Du fait de la complexité de la modélisation et de la taille de ces problèmes (les modèles 3D utilisent facilement quelques centaines de millions de variables d'état, beaucoup moins de paramètres de forme à optimiser, heureusement), les algorithmes d'optimisation doivent être entièrement repensés et adaptés, ne fût-ce que pour rendre l'optimisation possible.

Nous avons commencé des actions de recherche dans ce domaine, en collaboration avec le projet Tropics (A. Dervieux), dans le cadre d'un projet européen (Aeroshape), réunissant la plupart des constructeurs (Alenia, Aérospatial, Dassault, Dasa, British Aerospace, Casa, ...).

6.5 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).

6.6 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 5.6.1).

7 Actions régionales, nationales et internationales

7.1 Actions nationales

Participation au PNRH/INSU (Programme National de Recherche en Hydrogéologie de l'Institut National des Sciences de l'Univers "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 une collaboration avec l'Université du Colorado à Boulder (R. Byrd) et l'Université de Northwestern à Evanston (J. Nocedal), dans le cadre d'un accord NSF-Inria : méthodes de points intérieurs en optimisation non linéaire (voir [5]).

J. Ch. Gilbert a poursuivi la collaboration avec le Brésil, pour la co-tutelle (avec C. Gonzaga, Florianópolis, Brésil) de la thèse d'Elizabeth Karas : étude de chemins centraux pour les algorithmes de points intérieurs en optimisation convexe (voir [16]).

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".

J. Jaffré a été co-responsable avec le professeur Magne Espedal du département de mathématiques de l'université de Bergen, Norvège, du projet de coopération Aurora 2000 "Modélisation numérique de l'écoulement et du transport dans les milieux fracturés".

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 membre du conseil scientifique de la Division Mathématiques Appliquées de l'Université Technologique de Compiègne.
- J. Ch. Gilbert a été membre du comité scientifique des conférences suivantes: "8-ième journées du groupe MODE de la SMAI" (Toulouse, conférence annuelle d'optimisation), "AD-2000 - 3rd international conference/workshop on automatic differentiation: from simulation to optimization" (Nice).
- J. Jaffré est membre du comité éditorial du journal *Computational Geosciences*.
- M. Kern est l'organisateur du Colloquium de Rocquencourt (voir <http://www-rocq.inria.fr/fr/actualites/colloquium/index.htm>).

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

- Université de Bourgogne, Dijon, Cours intensif : *Optimisation Numérique, Aspect Numérique et Pratique*, 24 h., J. Ch. Gilbert.
- Université Panthéon-Sorbonne (Paris I), DEA Modélisation et Méthodes Mathématiques en Économie : *Méthodes newtoniennes en optimisation avec contraintes*, 21 h., J. Ch. Gilbert.
- Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), DEA Optimisation, Jeux et Modélisation en Économie : *Optimisation numérique*, 15 h., J. Ch. Gilbert.
- Université Paris-Dauphine, DESS Mathématiques de la Décision, Analyse Numérique, 18 h, Jérôme Jaffré.

8.3 Autres enseignements

- École des Mines de Paris, 1^{re} année : *Calcul différentiel*, 20 h., F. Clément.
- École des Mines de Paris, 2^e année : *Analyse numérique* (J. Henry), M. Kern est chargé de cours.
- Pôle universitaire Léonard de Vinci, Formation Scientifique et technique : *Problèmes inverses*, 40 h, M. Kern.
- Pôle universitaire Léonard de Vinci, formation de post-gradués en Calcul Scientifique : *Problèmes inverses*, 15 h, M. Kern.
- CESTI, 1^{re} année : *Approximation des EDP : méthodes de différences finies et d'éléments finis*, 40 h., J.-M. Cognet.
- ENSTA, 2^e année : *Optimisation différentiable : théorie et algorithmes*, 21 h., J. Ch. Gilbert, J.-M. Cognet.
- ENSTA, 3^e année : *Méthodes newtoniennes en optimisation avec contraintes*, 21 h., J. Ch. Gilbert.
- Lycée Lakanal (Sceaux), Mathématiques supérieures : *TP d'informatique, initiation au calcul formel*, 56 h., C. Leleu.

8.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- P. Armand, *A feasible BFGS interior point algorithm for solving strongly convex minimization problems*, International Symposium on Mathematical Programming, à Atlanta (Etats-Unis).

- F. Clément, *Waveform inversion of real CMP gathers*, 62nd Conference of the European Association of Geoscientists and Engineers, Glasgow (Royaume-Uni), 29 mai-2 juin.
- G. Chavent, *Indicateurs de raffinement interactifs pour la résolution de problèmes inverses : applications à l'estimation de la perméabilité d'un aquifère*, Douzième séminaire Mécanique des Fluides Numériques, CEA-INSTN, Saclay, 25-27 janvier.
- G. Chavent, *Optimal parametrization*, 2000 SPE workshop "History matching: Advanced Techniques", Cambridge (Royaume Uni), 28 février-3 mars, conférence invitée.
- G. Chavent, *On the stability of the estimation of conductivity from distributed measurement*, RCP264: Inverse Problems and Nonlinearity, Montpellier, 20-24 juin.
- G. Chavent, *On the link between non-linearity, sensitivity and scale in the estimation of the diffusion coefficient in a 2-D elliptic equation*, SFB conference on Inverse Problems, Strohl (Autriche), 26-30 juin, conférence invitée.
- G. Chavent, *Refinement-coarsening indicators for interactive data-driven parametrization and optimization*, FGI 2000 Conference on Optimization, Montpellier, 4-8 septembre.
- G. Chavent, *Parameterizing while inverting: refinement indicators for the estimation of diffusion coefficients*, 1st SIAM Conference on Computational Science and Engineering, Washington D.C. (Etats-Unis), 21-24 septembre.
- J. Ch. Gilbert: exposés à l'Université de Montpellier II, à l'Université de Cosenza (Italie), chez Alcatel (Marcoussis), à la conférence APMOD-2000 (Londres), au Workshop du projet européen Aeroshape (Braunschweig, Allemagne).
- C. Leleu, *Validity range of a 3D Born+ray model for the estimation of sea bottom and acquisition parameters in marine seismics*, 5th international conference on mathematical and numerical aspects of wave propagation, Santiago de Compostela (Espagne), 10-14 juillet.
- C. Leleu, *A 3-D Born+ray prestack depth migration for the estimation of acquisition parameters*, 70th Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Calgary (Canada), 6-11 août.
- M. Kern, *Imagerie du proche sous-sol par un radar géologique: modélisation et inversion*, Séminaire de calcul Scientifique, Université de Besançon, 30 mars.
- M. Kern, *Imagerie du proche sous-sol par un radar géologique: modélisation et inversion*, Séminaire à l'École d'été CEMRACS, Marseille, 24 juillet-30 août.
- M. Kern, *Parallel Simulation of Acoustic Waves*, SIAM Conference on Computation Science and Engineering, Washington (États-Unis), 21-24 septembre.
- J. Jaffré, du 15 janvier au 13 février, participation au programme IMA National Resources and Environment; *Domain decomposition techniques for transmission problems arising in flow in porous media*, Resource Recovery workshop, Institute for Mathematics and its Applications, University of Minnesota, Minneapolis (Etats-Unis), 9-13 février.

- J. Jaffré, *Numerical parameter estimation for flow in porous media*, The Mathematics of Porous Media, Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach (Allemagne), 23-29 janvier.
- J. Jaffré, invitation de deux semaines, du professeur Magne Espedal, au département de mathématiques de l'université de Bergen, Norvège, dans le cadre du programme Aurora 2000.

8.5 Diffusion de produits

Le code d'optimisation M1CG1 de Modulopt (minimiseur de problèmes quadratiques convexes par gradient conjugué avec préconditionnement ℓ -BFGS automatique, auteur: J. Ch. Gilbert) a été vendu à Météo France. Il a été donné pour usage académique à l'université de Limoges (P. Armand, Ph. Ségalat, utilisation dans un code de points intérieurs) et à l'université de Grenoble (P. Veersé).

Les codes d'optimisation M2QN1 (pour problèmes d'optimisation avec contraintes de borne) et M1QN3 (pour problèmes d'optimisation sans contrainte de très grande taille) de Modulopt ont été mis à disposition chez Alcatel Câble France (P. Sillard).

8.6 Conseil en entreprises

- J. Jaffré est membre du conseil scientifique de l'Andra (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs).
- Alcatel Câble France : J. Ch. Gilbert.
- IFP : G. Chavent, F. Clément, J. Ch. Gilbert.
- Renault : P. Armand, J. Ch. Gilbert.
- Andra : M. Kern.

9 Bibliographie

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [1] C. ALBOIN, *Deux outils mathématiques pour modéliser l'écoulement et le transport de polluants dans un milieu poreux fracturé*, thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine, janv. 2000.

Articles et chapitres de livre

- [2] C. ALBOIN, J. JAFFRÉ, J. ROBERTS, X. WANG, C. SERRES, «Domain decomposition for some transmission problems in flow in porous media», *in: Numerical Treatment of Multiphase Flows in Porous Media, Lecture Notes in Physics*, Springer, 2000, p. 22–34.
- [3] P. ARMAND, J. GILBERT, S. JAN-JÉGOU, «A feasible BFGS interior point algorithm for solving strongly convex minimization problems», *SIAM Journal on Optimization* 11, 2000, p. 199–222.

- [4] P. ARMAND, J. GILBERT, «A piecewise line-search technique for maintaining the positive definiteness of the updated matrices in the SQP method», *Computational Optimization and Applications* 16, 2000, p. 121–158, <http://www-rocq.inria.fr/~gilbert/preprint/14+sqp-pls.ps.gz>.
- [5] 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, <http://www-rocq.inria.fr/~gilbert/preprint/16+ip-tr.ps.gz>.
- [6] F. CLÉMENT, G. CHAVENT, S. GÓMEZ, «Migration-based travelttime waveform inversion of 2-D simple structures: A synthetic example», *Geophysics*, 2000, (à paraître).

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [7] C. ALBOIN, J. JAFFRÉ, P. JOLY, J. ROBERTS, «On a convolution operator arising in a double porosity model», in: *Proceedings CD of MTNS 2000, Perpignan, 19-23 juin*, A. El Jai, M. Fliess (éditeurs), 2000.
- [8] F. CLÉMENT, G. CHAVENT, «Waveform inversion of real CMP gathers», in: *62nd Mtg. Eur. Assoc. of Geoscient. and Eng., Extended Abstracts*, 2000.
- [9] J.-M. COGNET, Y.-H. DE ROECK, G. CHAVENT, «Modélisation des rayons multiples pour résoudre un problème d'inversion sismique», in: *Actes du 32e congrès national d'analyse numérique*, SMAI, p. C48, 2000.
- [10] J.-M. COGNET, Y.-H. DE ROECK, G. CHAVENT, «The seismic inverse problem with a source identification», in: *Proc. of the 5th Internat. Conf. on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*, SIAM, p. 643–647, 2000.
- [11] C. LELEU, Y.-H. DE ROECK, F. CLÉMENT, G. CHAVENT, «A 3-D Born+ray prestack depth migration for the estimation of acquisition parameters», in: *70th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 2000.
- [12] C. LELEU, Y.-H. DE ROECK, F. CLÉMENT, G. CHAVENT, «Validity range of a 3D Born+ray model for the estimation of sea bottom and acquisition parameters in marine seismics», in: *Proc. of the 5th Internat. Conf. on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*, SIAM, p. 975–979, 2000.

Rapports de recherche et publications internes

- [13] F. AKOA, «Vers une résolution de l'équation instationnaire par la méthode des régions de confiance», *Rapport de stage*, INRIA, 2000.
- [14] P. ARMAND, J. GILBERT, S. JAN-JÉGOU, «A BFGS-IP algorithm for solving strongly convex optimization problems with feasibility enforced by an exact penalty approach», *Rapport de Recherche n° 4087*, INRIA, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4087.html>.
- [15] G. CHAVENT, K. KUNISCH, «The output least square identifiability of the diffusion coefficient from an H^1 -observation in a 2-D elliptic equation», *Rapport de Recherche n° 4067*, INRIA, BP 105, 78153 Le Chesnay, France, 2000, soumis à Mathematical Programming, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4067.html>.

-
- [16] J. GILBERT, C. GONZAGA, E. KARAS, « Examples of ill-behaved central paths in convex optimization », *Rapport de recherche*, INRIA, BP 105, 78153 Le Chesnay, France, 2000, soumis à Mathematical Programming.
- [17] P. HAVÉ, « Développement d'un logiciel parallèle de simulation d'ondes acoustiques 3D », *Rapport de stage de DEA*, Université de Paris 6, 2000.
- [18] W. HUNSDORFER, J. JAFFRÉ, « Implicit-explicit time stepping with spatial discontinuous finite elements », *Rapport de recherche*, INRIA, BP 105, 78153 Le Chesnay, France, 2000, (à paraître), soumis à Mathematical Programming.
- [19] J. JAFFRÉ, J. E. ROBERTS, X. WANG, « A numerical model for two-phase flow in a porous medium with two rock types », *Rapport de recherche*, INRIA, BP 105, 78153 Le Chesnay, France, 2000, soumis à publication.
- [20] V. MARTIN, « Méthode des domaines fictifs appliquée aux écoulements en milieu fracturé », *Rapport de stage de DEA*, Université Claude Bernard, Lyon, 2000.