Curriculum vitae
Activité scientifique

Sebastian Minjeaud

minjeaud@unice.fr

http://math.unice.fr/~minjeaud/

27 octobre 2011

Ce document comprend mon *curriculum vitae* (section I) et une synthèse de mes travaux de recherche et d'enseignement (section II). Les documents suivants sont placés en annexe :
- un résumé des travaux de thèse,
- un résumé des travaux de post-doctorat,

Contenu

I. CURRICULUM VITAE

Sebastian Minjeaud

Né le 21 mars 1983,

Pacsé, 28 ans,

Nationalité française.

Page web : `http://math.unice.fr/~minjeaud/`

Adresse professionnelle :

Université de Nice-Sophia Antipolis
Laboratoire J.-A. Dieudonné, Bureau 818,
Parc Valrose,
28, avenue Valrose,
06108 Nice Cedex 2

Tél. : 04 92 07 60 31

Mail : `minjeaud@unice.fr`

Situation administrative

2011–	**CR2 CNRS** Laboratoire J.-A. Dieudonné, Université de Nice-Sophia Antipolis.
2010-2011	**Post-doctorant INRIA** INRIA Lille Nord Europe, Projet SIMPAF, Responsables : C. Besse (Univ. Lille 1) et P. Laffite (Univ. Lille 1).
2007-2010	**Doctorant–Moniteur** Thèse sous la direction de Franck Boyer et Bruno Piar, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III).
2003-2007	Elève fonctionnaire stagiaire de l'**Ecole Normale Supérieure de Cachan**, Antenne de Bretagne – Département de mathématiques.

Scolarité et diplômes

Septembre 2010	**Thèse de Mathématiques appliquées** à l'IRSN Cadarache et au LATP (Université Paul Cézanne Aix-Marseille III)
Titre	Raffinement local adaptatif et méthodes multiniveaux pour la simulation d'écoulements multiphasiques.
Début de thèse	le 2 octobre 2007.
Soutenance	le 27 septembre 2010 à Marseille, mention très honorable.

Jury

Directeur	Franck BOYER	Université Paul Cézanne
Encadrant	Bruno PIAR	IRSN Cadarache
Rapporteurs	Jean-Frédéric GERBEAU	INRIA Rocquencourt
	Jean-Luc GUERMOND	Texas A&M University
Examinateurs	Emmanuel CREUSÉ	Université Lille 1
	Bruno DESPRÉS	Université Paris 6
	Jean-Claude LATCHÉ	IRSN Cadarache.

Juin 2007	**Master 2 recherche**, EDP et analyse numérique, mention Très Bien, Classement 2e (Univ. Provence).
2006	**Agrégation de Mathématiques**, Classement 100e.
Juin 2005	**Master 1 de Mathématiques**, modélisation et calcul scientifique, mention Très Bien (Univ. Rennes 1).
Juin 2004	**Licence de Mathématiques**, mention Très Bien (Univ. Rennes 1).

Juin 2004	**Licence d'informatique** (Univ. Rennes 1).
2003-2007	**Elève normalien de l'ENS Cachan - Antenne de Bretagne**.
2002-2003	**Classe préparatoire MP*** - Lycée Thiers, Marseille (13).
2001-2002	**Classe préparatoire MPSI** - Lycée Thiers, Marseille (13).
2001	**Baccalauréat S** - Lycée Joliot-Curie, Aubagne (13), mention Bien.

Thèmes de recherche

- Simulations numériques directes d'écoulements multiphasiques.
- Modèles à interfaces diffuses de type Cahn-Hilliard.
- Méthodes de projection pour les équations de Navier-Stokes incompressibles.
- Méthodes des éléments finis conformes.
- Méthodes de raffinement local et préconditionneurs multigrilles.
- Modélisation d'irrégularités du plasma ionosphérique terrestre.

Compétences informatiques

- Système d'exploitation : maîtrise de Linux et des systèmes Unix.
- Langages de programmation : Maple, CAML, Fortran, Matlab, Scilab, C, C++.
- Librairies d'algèbre linéaire : BLAS, LAPACK, UMFPACK, PETSC.
- Bibliothèque de communication par passage de message (MPI) : openMPI.
- Outils de visualisation : General Mesh Viewer (GMV), ParaView.
- Outils de gestion de version : CVS, subversion (svn).
- Environnement de développement : eclipse.

Tous ces outils ont été mis en oeuvre lors de projets (*cf* section II.1, rubrique "Codes de calcul et projets").

- Pratique du développement collaboratif dans la plateforme PELICANS :

`https://gforge.irsn.fr/gf/project/pelicans/`

programmation objet C++, développement Agile piloté par les tests, programmation par contrat.

Formations complémentaires

Formations au Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur (CIES) de Provence
2007-2010 dans le cadre du monitorat.

Cours de Master 2 suivis pendant la thèse et après

2010-2011	Calcul scientifique avancé (Cours de T. Goudon, INRIA Lille)
2009-2010	Existence et régularité pour des problèmes elliptiques linéaires et non linéaires (Cours de Y. Sire, Univ. Paul Cézanne)
2008-2009	Solutions approchées des équations de Navier-Stokes compressibles (Cours de T. Gallouët et R. Herbin, Univ. de Provence)
2007-2008	Problèmes aux limites hyperboliques, (Cours de O. Guès, Univ. de Provence)

Conférences et écoles thématiques

- 3rd summer school of the Large Scale Initiative "FUSION", Paris, 26-30 septembre 2011.
- Rencontres numériques, Méthode de type Galerkine discontinu, Lille, 6-7 décembre 2010.
- Ecole thématique "Avancées récentes en calcul scientifique", CIRM, Marseille, du 9 au 13 février 2009.
- International Conference On Preconditioning Techniques For Large Sparse Matrix Problems In Scientific And Industrial Applications (Precond 07), Toulouse, Juillet 2007.

II. ACTIVITÉS de RECHERCHE et d'ENSEIGNEMENT

II.1 Production scientifique (http://math.unice.fr/~minjeaud/)

Mémoire de thèse

Raffinement local adaptatif et méthodes multiniveaux pour la simulation d'écoulements multiphasiques. Thèse de l'université Paul Cézanne (Aix-Marseille III), soutenue le 27/09/2010.
`http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00535892/fr/`

Articles parus ou acceptés dans des revues à comité de lecture

[1] F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *A local adaptive refinement method with multigrid preconditionning illustrated by multiphase flows simulations*,
ESAIM Proceedings, 27, pp. 15–53, 2009,
DOI : 10.1051/proc/2009018.

Article rédigé sur invitation des éditeurs suite au prix POSTER CANUM 2008.

[2] F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, M. Quintard, *Cahn-Hilliard / Navier-Stokes model for the simulation of three-phase flows*,
Transport in Porous Media, 82(3), pp. 463–483 , 2010,
DOI : 10.1007/s11242-009-9408-z.

[3] F. Boyer, S. Minjeaud, *Numerical Schemes for a three component Cahn-Hilliard model*,
ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis (M2AN), 45(4), pp.697–738, 2011,
DOI : 10.1051/m2an/2010072.

Articles soumis dans des revues à comité de lecture

[4] F. Dardhalon, J.C. Latché, S. Minjeaud, *Analysis of a projection method for low order non-conforming finite elements*, 2011.

Cet article contient une version détaillée de l'étude de la méthode de projection incrémentale dans le cas d'une discrétisation spatiale effectuée avec des éléments finis de bas degré non conformes (de type Rannacher-Turek). Il s'agit des travaux présentés dans la section VII.2 de mon manuscrit de thèse. Cet article est disponible à l'adresse suivante :
`http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00566310/fr/`

[5] S. Minjeaud, *An unconditionally stable uncoupled scheme for a triphasic Cahn-Hilliard/Navier-Stokes system*, 2011.

Cet article reprend le contenu du chapitre VI de mon manuscrit de thèse : description et étude théorique d'un schéma inconditionnellement stable permettant une résolution découplée dans chaque pas de temps des systèmes de Cahn-Hilliard et Navier-Stokes. Cet article est disponible à l'adresse suivante : `http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00577226/fr/`

[6] S. Minjeaud, *An adaptive pressure correction method without spurious velocities for diffuse-interface models of incompressible flows*, 2011.

Cet article reprend le contenu de la section VII.1 de mon manuscrit de thèse : variante de la méthode de projection incrémentale visant à réduire les vitesses parasites et une illustration par le phénomène des courants parasites lorsque le système de Navier-Stokes est couplé aux équations de Cahn-Hilliard. Cet article est disponible à l'adresse suivante : `http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00636296/fr/`

Actes de conférences à comité de lecture

- F. Boyer, S. Minjeaud, *Fully discrete approximation of a three component Cahn-Hilliard model*, Proceedings of ALGORITMY the 18th Conference on Scientific Computing (Vysoké Tatry - Podbanské, Slovaquie), 2009.
  `http://pc2.iam.fmph.uniba.sk/amuc/_contributed/algo2009/minjeaud.pdf`

Communications lors de conférences internationales *

- F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *Numerical methods for the simulation of a diffuse interface model for three-phase flows*, Workshop on Phase Field Models in Fluid Mechanics, Regensburg (Allemagne), du 14 au 16 février 2011.
- F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *Local refinement and multigrid method for a ternary Cahn-Hilliard/Navier-Stokes model*, Workshop on Discretization methods for viscous flows, Carry-le-Rouet, du 8 au 10 septembre 2010.
- F. Dardhalon, J.-C. Latché, S. Minjeaud, *Projection method and non conforming finite elements*, International congress in mathematical fluid dynamics and its applications, Rennes, du 21 au 24 juin 2010.
- F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *Local refinement and multigrid method for a ternary Cahn-Hilliard/Navier-Stokes model*, Workshop on discretization methods for viscous flows, Part II : compressible and incompressible flows, Porquerolles, du 24 au 26 juin 2009.
- F. Dardhalon, J.-C. Latché, S. Minjeaud, *Projection method and non conforming finite elements*, Workshop on discretization methods for viscous flows, Part II : compressible and incompressible flows, Porquerolles, du 24 au 26 juin 2009.
- F. Boyer, S. Minjeaud, *Fully discrete approximation of a three component Cahn-Hilliard model*, ALGORITMY 2009, Podbanske (Slovaquie), du 16 au 20 mars 2009.
- F. Boyer, S. Minjeaud, B. Piar, *Local adaptive refinement and multigrid method for multiphase flows simulations*, Ecole thématique "Avancées récentes en calcul scientifique" du CIRM, Marseille, du 9 au 13 février 2009.
- F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *A Multigrid method for evolution problem with local adaptive refinement*, 9th IMACS Internal Symposium on Iterative Methods in Scientific Computing, Lille, du 17 au 20 mars 2008.
- F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *Hierarchical Refinement for the Finite Element Solution of Cahn-Hilliard/Navier-Stokes Equations*, Trends in Numerical and Physical Modeling for Industrial Multiphase Flows, Cargèse, du 17-21 septembre 2007.

*. Le nom souligné est celui de l'orateur

*Communications lors de conférences nationales**

- F. Boyer, S. Minjeaud, B. Piar, *Simulations d'écoulements multiphasiques à l'aide d'un modèle à interfaces diffuses.* Journées DYNAMO, Lyon, du 23 au 25 mars 2011.
  CONFÉRENCE INVITÉE.
- F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *Méthodes numériques pour la simulation d'écoulements triphasiques à l'aide d'un modèle de type Cahn-Hilliard/Navier-Stokes*, 23ième séminaire "Mécanique des fluides numérique" du CEA-GAMNI, IHP, Paris, les 24 et 25 janvier 2011.
  CONFÉRENCE INVITÉE.
- S. Minjeaud, B. Piar, *Modèle à interfaces diffuses de type Cahn-Hilliard/Navier-Stokes – Courants parasites* , 40ème Congrès National d'Analyse Numérique (CANUM), Carcans Maubuisson, du 31 mai au 4 juin 2010.
- F. Dardalhon, J.-C. Latché, S. Minjeaud, *Projection method and non conforming finite elements*, 40ème Congrès National d'Analyse Numérique (CANUM), Carcans Maubuisson, du 31 mai au 4 juin 2010.
- F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, *Résolution numérique d'un modèle de Cahn-Hilliard triphasique*, 39eme Congrès National d'Analyse Numérique (CANUM), Saint Jean de Monts, du 26 au 30 mai 2008. LAURÉAT D'UN PRIX POSTER.

Distinctions scientifiques

- Prix POSTER CANUM 2008

Exposés à l'occasion de séminaires et groupes de travail

- Séminaire de l'équipe EDP Analyse Numérique, Nice, le 13 octobre 2011.
- Rencontres niçoise de mécanique des fluides, Nice, le 16 mai 2011.
- Séminaire de Mathématiques appliquées, Clermont-Ferrand, le 24 mars 2011.
- Séminaire de l'équipe MIP, Toulouse, le 22 février 2011.
- Séminaire de Mathématiques appliquées, Nantes, le 3 février 2011.
- Seconde réunion plénière de l'ANR Iodissee, Lille, le 13 janvier 2011.
- Journées des thèses de l'IRSN, Arles, du 22 septembre au 24 septembre 2010.
- GdT mécanique des fluides de l'INSA, Toulouse, le 1 mars 2010.
- Séminaire ANEDP, Lille, le 25 février 2010.
- Séminaire du LATP, Marseille, le 17 novembre 2009.
- GdT "applications des mathématiques" de l'ENS Cachan-Ker Lann,
  Rennes, le 14 octobre 2009.
- Journées des thèses de l'IRSN, Aussois, du 28 septembre au 1er octobre 2009.
- Journées des thèses de l'IRSN, Vogüe, du 6 au 9 octobre 2008.

Codes de calcul et projets

2007-10 Contributions au développement de la plateforme PELICANS :
librairie C++, parallèle (MPI), pour le développement d'applications en calcul scientifique, (`https://gforge.irsn.fr/gf/project/pelicans/`). Plus spécifiquement, j'ai contribué à la mise en place et à l'amélioration des fonctionnalités suivantes :
- raffinement local.
- préconditionneurs multigrilles.
- parallélisation du raffinement local et des méthodes multigrilles.

- application dédiée à la résolution d'un modèle Cahn-Hilliard/Navier-Stokes triphasique.

2007 Stage de Master 2 (6 mois) encadré par F. Boyer et B. Piar, IRSN,
Raffinement local et méthodes multiniveaux. Développement collaboratif C++.

2007 Projets d'étude de Master 2 (collaboration avec S. Krell), Univ. de Provence,
- Ecoulement dans un réservoir pétrolier en 2D (cours de T. Gallouet), Code Fortran.
- Discrétisation de problèmes 1D elliptiques et hyperboliques (cours de R. Herbin), Code Matlab.
- Introduction aux ondelettes (cours de J. Liandrat), Code Matlab.

2005 Stage de Master 1 (2 mois), en binôme avec S. Krell, encadré par F. Hubert, Univ. de Provence,
Etude d'écoulements monophasiques dans les milieux poreux fissurés. Modélisation, Approximation par éléments finis et volumes finis. Code C et Matlab.

2005 Projet d'étude de Master 1, en binôme avec S. Krell, Univ. Rennes 1, (cours de E. Darrigrand et Y. Lafranche),
Implémentation d'un schéma éléments finis sur maillage quadrangles et triangles structurés pour le problème de Poisson. Code C.

2004 Projet d'étude de Licence (1 mois), en trinôme avec C. Dunand et S. Krell, encadré par P. Boissoles, Univ. Rennes 1,
Etude et implémentation d'algorithmes pour l'approximation numérique d'intégrales elliptiques intervenant dans l'expression de champs magnétiques, notamment dans le domaine de l'imagerie à résonance magnétique (IRM). Code Matlab.

II.2 Participation à des groupements de recherche et ANR

2010-... Membre de l'ANR Iodissee, IOnospheric DIsturbanceS & SatEllite-to-Earth communications.
`http://iodissee.math.cnrs.fr/index.html`

2007-09 Membre du GDR MOAD, MOdélisation, Asymptotique Dynamique non-linéaire.
`http://moad.univ-lyon1.fr/Main.php`

II.3 Activités d'enseignement

Encadrement de Stage

Avril/Septembre 2009 : Stage Master 2 Recherche "EDP et calcul scientifique" de Fanny Dardhalon,

"Méthode de projection et éléments finis non conformes"

Travaux dirigés et pratiques

2010-2011 : TP Calcul scientifique avancé, Master 2 (ingénieurie mathématique), Univ. Lille 1, 15h.
Schémas pour l'advection-diffusion instationnaire 1D et 2D , schémas pour Burgers 1D, méthodes de splitting, schéma cinétique pour Euler 1D, Avec Scilab.
Initiation à la programmation avec la librairie C++ PELICANS (résolution éléments finis de l'équation de Laplace).

2009-2010 : 3^e année de Monitorat, Univ. Paul Cézanne.

- TD Analyse, Licence 2 (filière mathématiques), 36h.
  Séries numériques, Intégrales généralisées, Suites de fonctions, Séries de fonctions.
- TD/TP Analyse numérique, Master 1 (mathématiques et applications), 20h.
  Equations différentielles ordinaires, Equations de transport, Equations elliptiques. Avec Scilab.
- Soutien Analyse, Licence 1 et 2 (filière mathématiques), 5h+5h.
  Corrections des examens. Exercices.

2008-2009 : 2^e année de Monitorat, Univ. Paul Cézanne.

- TD Méthodologie mathématique, Licence 1 (filière mathématiques), 18h.
  Eléments de logique, ensembles et applications, Applications injectives, surjectives, bijectives, image réciproque et image directe, Notion de fini et d'infini.
- TD Calcul différentiel, Licence 2 (filière mathématiques), 40h.
  Notions de bases de topologie dans $\mathbb{R}^n$, Etude des fonctions de plusieurs variables.
- Soutien Analyse, Licence 1 (filière mathématiques), 5h.
  Corrections des examens. Exercices.

2007-2008 : 1^{ere} année de Monitorat, Univ. Paul Cézanne.

- TD/TP Analyse numérique, Licence 2 (filière mathématiques), 24h/8h.
  Arithmétique machine et erreurs d'arrondis, Algorithme de Newton et erreurs de troncature, Méthodes élémentaires de quadrature et erreurs d'approximation, Notion sur l'analyse a posteriori de l'erreur et sur l'accélération de convergence. Avec Matlab.
- TD Séries et applications, Licence 2 (filière SPI), 34h.
  Séries numériques, Intégrales généralisées, Séries entières, Séries de Fourier.

2006-2007 : TP Classes préparatoires BCPST 1^{ere} année, Lycée Thiers (Marseille), 96h.
Introduction à Matlab, Algorithmique élémentaire (variables, affectations, boucles, structures conditionnelles, fonctions), Manipulation des vecteurs et matrices, Applications à des algorithmes de tri et à la méthode du pivot de Gauss.

Diffusion de l'information scientifique

2010 Projet pluridisciplinaire CIES, avec C. Flaux, S. Krell, L. Menabreaz, S. Rigaud.
"De Berre à Mariout : l'histoire des lagunes méditerranéennes".
Sensibilisation d'écoliers français et égyptiens aux environnements des lagunes méditerranéennes autour de 4 ateliers : écosystème aquatiques lagunaires, marins et continentaux ; eau et sel ; pollution ; sédimentation.
Intervention (1 journée) dans une classe (CM1) de l'école primaire Sinoncelli à Marseille.

ANNEXES

Sebastian Minjeaud

Adresse professionnelle :

Université de Nice-Sophia Antipolis
Laboratoire J.-A. Dieudonné, Bureau 818,
Parc Valrose,
28, avenue Valrose,
06108 Nice Cedex 2

Tél. : 04 92 07 60 31

Pacsé, 28 ans,
Né le 21 mars 1983,
Nationalité française.

minjeaud@unice.fr
http://math.unice.fr/~minjeaud/

Résumé des travaux de thèse : Raffinement local adaptatif et méthodes multiniveaux pour la simulation d'écoulements multiphasiques

Contrat de thèse IRSN : octobre 2007 - octobre 2010
Université Paul Cézanne, Ecole doctorale de mathématiques et d'informatique de Marseille
Directeur de thèse : Franck Boyer, LATP Université Paul Cézanne
Responsable IRSN : Bruno Piar, DPAM/SEMIC/LIMSI

Introduction : Contexte et motivations

Une dégradation avancée d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée lors d'un hypothétique accident majeur peut conduire, selon les scénarios envisagés, à la formation d'un bain de corium (mélange des matériaux fondus du cœur et de la cuve) dans le puits de cuve. Le corium, encore chauffé par le dégagement de puissance résiduelle dû à la désintégration des produits de fission, interagit avec les structures en béton qui le contiennent, et le bain érode peu à peu le radier ainsi que les parois latérales. Cette interaction s'accompagne de relâchements importants de gaz : vaporisation de l'eau contenue dans le béton et formation de dioxyde de carbone principalement par décomposition du calcaire. Le bain est alors traversé par un flux de bulles.

Le corium liquide est un mélange complexe. Nous nous intéressons à une configuration probable du bain de corium dans laquelle deux phases principales, l'une majoritairement oxyde et l'autre majoritairement métallique, se séparent pour atteindre une géométrie stratifiée (dès que l'agitation engendrée par le flux gazeux tombe en deçà d'un certain seuil). Ce phénomène a un impact majeur sur le déroulement de l'accident : la couche métallique, beaucoup plus conductrice, constitue un pont thermique entre la couche oxyde, dans laquelle est générée l'essentiel de la puissance, et les parois ; la progression de l'érosion de la cavité en est fortement affectée ainsi que, en conséquence, les modes et temps de percée du puits de cuve (percée latérale ou verticale). De plus, le flux gazeux influence grandement les transferts entre les deux phases (modification des couches limites thermiques, changements topologiques de l'interface oxyde/métal avec entraînement éventuel du métal) pouvant accélérer l'ablation du béton dans une direction (horizontale ou verticale). La quantification de ces échanges thermiques et massiques reste un problème ouvert préjudiciable à la fiabilité des simulations d'accident actuelles [Cra07].

L'étude des échanges de masse et de chaleur entre deux phases liquides stratifiées lors du passage d'un flux de bulles fait l'objet depuis plusieurs années d'une approche par simulation numérique directe. Un modèle mathématique a été élaboré et étudié lors de la thèse de Céline Lapuerta [BL06, Lap06]. Ce modèle repose sur une représentation des interfaces par des zones d'épaisseur finie, certes faible mais supérieure aux épaisseurs réelles. On parle de méthodes à interfaces diffuses. Une phase i est décrite géométriquement par une fonction régulière, appelée paramètre d'ordre, valant 1 dans la phase i, 0 en dehors, et variant continûment entre 0 et 1 dans les interfaces entre la phase i et les autres phases. Le modèle mathématique est alors constitué d'un système d'équations aux dérivées partielles de type Cahn-Hilliard/Navier-Stokes posé sur l'ensemble du domaine géométrique, qui présente l'avantage essentiel de permettre un suivi implicite des interfaces. Ses potentialités ont été démontrées par validation sur des tests analytiques, mais son application au cas réacteur pose des difficultés numériques identifiées [Lap06].

L'objet de mon travail de thèse a été la mise au point, l'analyse et la validation de schémas de résolution permettant de lever ces difficultés.

Concernant la discrétisation en espace, le choix de la taille des mailles est d'une importance cruciale puisqu'il détermine à la fois la qualité de l'approximation numérique et la difficulté de résolution du problème discret. La présence de différentes échelles dans les simulations (les interfaces étant de dimensions petites devant celles du domaine) suggère d'adapter dynamiquement la taille des cellules selon les parties du domaine, en fonction des variations attendues des inconnues du système, on parle de raffinement local.

La méthode choisie, basée sur les procédures CHARMS [KGS03], a été étudiée dans [BLMP09]. Un des principaux avantages de cette méthode est qu'elle permet de définir un algorithme de coarsening simple autorisant ainsi l'exploitation de la structure multiniveau obtenue, pour construire des préconditionneurs multigrilles.

Il est souhaitable que le choix de la discrétisation en temps conduise à une décroissance de l'énergie qui permet de déduire des estimations *a priori* sur les solutions discrètes, gage de stabilité et qui s'avèrent suffisantes pour démontrer leur existence et dans ce cas leur convergence vers une solution faible du modèle. Cependant, le schéma implicite couramment utilisé ne permet pas de garantir la décroissance de l'énergie discrète, nous amenant ainsi à considérer d'autres discrétisations, adaptées à la forme de l'équation de Cahn-Hilliard.

La discrétisation en temps des équations de Navier-Stokes est effectuée par une méthode de projection incrémentale, moins coûteuse en temps de calcul que les méthodes de type Lagrangien augmenté. L'utilisation du raffinement local implique quelques modifications de ce schéma : en effet, l'évolution des espaces d'approximation consécutive à l'adaptation de maillage rend nécessaire l'introduction d'une sous-étape supplémentaire dans la méthode de projection incrémentale.

Un schéma spécifique pour les termes de couplage entre les systèmes de Cahn-Hilliard et Navier-Stokes a été introduit permettant de garantir la décroissance de l'energie totale (somme de l'énergie libre de Cahn-Hilliard et de l'énergie cinétique) tout en autorisant une résolution totalement découplée des deux systèmes discrétisés.

Enfin, les simulations en géométrie tridimensionnelle (non axisymétrique) sont particulièrement coûteuses en ressources informatiques (place mémoire et temps CPU). L'introduction de techniques de calcul parallèle permet une exécution du code sur des systèmes à mémoire distribuée : chaque entité du système stocke et traite uniquement les données relatives à une partie du domaine, les échanges nécessaires à la résolution globale du problème étant organisés grâce à l'utilisation de bibliothèques de communication par passage de message.

I Raffinement local adaptatif

La capture numérique des phénomènes de transfert au voisinage des interfaces requiert une finesse de maillage qui devient rédhibitoire si elle est appliquée à l'ensemble du domaine de calcul (notamment en géométrie tri-dimensionnelle, qui est la seule effectivement pertinente dans des études de simulation directe). Les techniques de raffinement local adaptatif deviennent alors des méthodes de choix, puisqu'elles permettent d'affiner dynamiquement la représentation discrète des inconnues en se focalisant sur les zones sensibles (choix de cellules de petites tailles au voisinage des interfaces), tout en limitant le nombre total de mailles.

Le problème discret en espace est formulé à l'aide de la méthode des éléments finis : les inconnues sont exprimées comme une combinaison d'un ensemble de fonctions locales, appelées fonctions de base, dont la résolution spatiale est directement déterminée par la taille des mailles qui leur sont associées. Ainsi, pour augmenter la précision dans une zone choisie, il suffit de diviser chaque maille de cette zone en quelques mailles plus petites. Cependant, cela conduit à un placement non conforme des cellules (Figure 1) qui rend délicate la formulation du problème discret. De nombreuses techniques permettent d'éviter de tels placements mais elles sont spécifiques à chaque forme géométrique de mailles. La méthode CHARMS [KGS03], plus générique, permet de prendre en compte implicitement les situations non conformes en adoptant le point de vue de "raffinement des fonctions de base".

Le raffinement d'une fonction de base est rendu possible par l'existence conceptuelle d'une suite emboîtée de grilles uniformément raffinées desquelles sont déduites des relations "parents-enfants" reliant les fonctions de base de deux niveaux successifs. Raffiner ou déraffiner des fonctions de base signifie remplacer les parents (respectivement les enfants) par leurs enfants (respectivement leurs parents), les espaces d'approximation restant alors par construction conformes.

Cette méthode de construction de bases éléments finis à résolution spatiale adaptative a été étudiée dans [BLMP09] puis développée dans la plate-forme C++ PELICANS (*cf* [PEL]) et appliquée à des écoulements triphasiques. La Figure 2 montre un exemple de simulation de l'étalement d'une lentille piégée entre deux phases stratifiées. Sur cette figure sont représentés les interfaces entre les trois phases (une dans la partie supérieure, une dans la partie inférieure et enfin l'autre piégée dans la lentille) ainsi que le maillage utilisé pour le calcul.

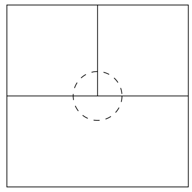
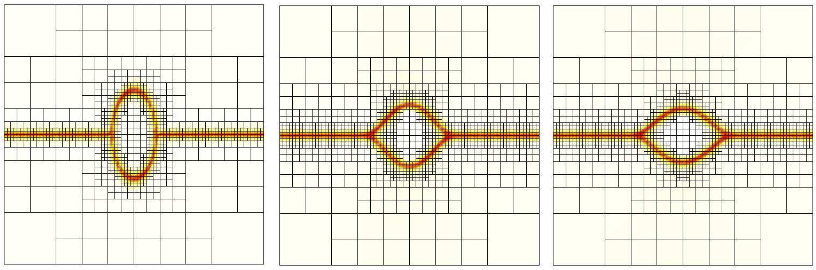


Figure 1 – Position non conforme des mailles.



$t = 0$ $\qquad$ $t = 2.10^{-3}$ $\qquad$ $t = 3.10^{-3}$

Figure 2 – Exemple de simulation de l'évolution d'une lentille piégée entre deux phases stratifiées.

L'article [BLM+10] donne une vue d'ensemble de l'établissement et des propriétés des équations du modèle de Cahn-Hilliard triphasique tel qu'il est présenté dans la thèse [Lap06] ainsi que les premières applications (notamment en trois dimensions) du raffinement local.

II Méthodes de préconditionnement multigrille

Afin d'accélérer la résolution du problème discret, nous avons choisi d'exploiter la structure multiniveau créée par l'algorithme de raffinement local pour construire des préconditionneurs multigrilles [BZ00]. Ils permettent en effet d'obtenir un nombre d'itérations indépendant du nombre d'inconnues et sont donc particulièrement attractifs. L'idée générale des méthodes multigrilles est de remplacer la résolution directe du problème discret (posé sur un seul maillage) par la résolution rapide d'une succession de problèmes posés sur une hiérarchie de grilles auxiliaires de plus en plus grossières (Figure 3) issue du maillage de départ ; à chaque étape, les informations obtenues étant utilisées pour apporter des corrections aux résolutions précédentes.

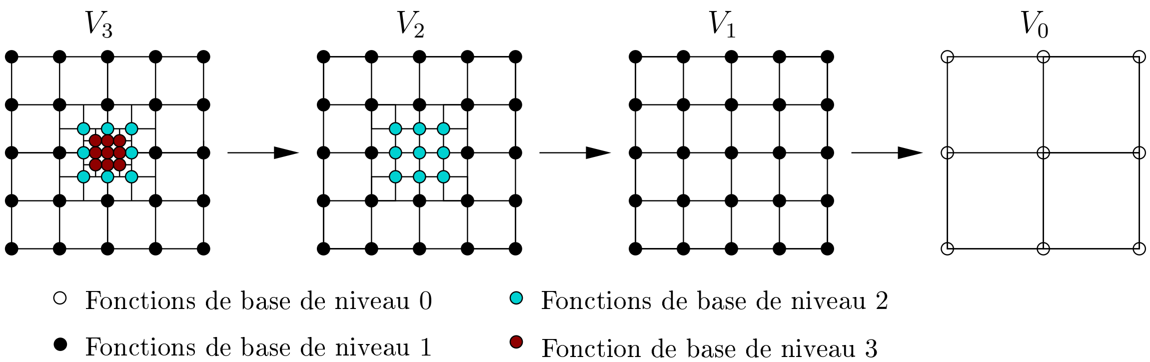


Figure 3 – Exemple de construction de grilles auxiliaires par déraffinement.

A partir d'un espace d'approximation éléments finis composite (contenant plusieurs niveaux de raffinement) obtenu grâce à la méthode de raffinement local décrite ci-dessus, il est possible par "déraffinement" de reconstruire une suite d'espaces emboîtés auxiliaires (Figure 3) permettant ainsi d'entrer dans le cadre abstrait multigrille développé dans [BZ00] ; les opérateurs de transfert entre les grilles étant déduits des relations parents-enfants de la méthode CHARMS.

Cette méthode multigrille a été décrite dans [BLMP09] puis développée dans la plate-forme C++ PELICANS (*cf* [PEL]), validée sur des exemples académiques, et appliquée à la résolution du modèle de Cahn-Hilliard triphasique. Le tableau 1 illustre les résultats, en mettant en évidence le gain (en nombre d'itérations) généré par l'utilisation des méthodes multigrilles en comparaison au préconditionneur plus classique ILU0.

Pas de temps numéro	1	2	3
Nombre d'inconnues	29020	30060	29252
ILU0	348	333	348
Multigrille additif	65	63	65
Multigrille multiplicatif	21	17	17

TABLE 1 – Nombre d'itérations des solveurs algébriques préconditionnés en fonction du nombre d'inconnues.

III Discrétisation en temps des équations de Cahn-Hilliard

Le modèle de Cahn-Hilliard décrit l'évolution du système à travers la minimisation d'une énergie libre s'exprimant comme la somme de termes capillaires (mettant en jeu les tensions de surfaces) et d'un terme non linéaire, le potentiel de Cahn-Hilliard. De par la forme particulière de ce potentiel, le modèle de Cahn-Hilliard triphasique permet de prendre en compte les différentes situations physiques liées aux valeurs des tensions de surface : étalement partiel ou total (Figure 4).

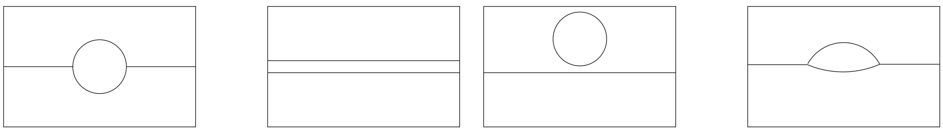
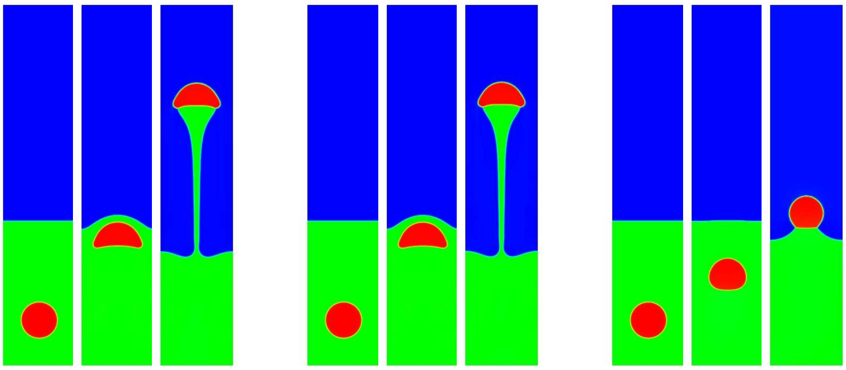


FIGURE 4 – Situations d'étalement total et partiel

Lors de la discrétisation, il faut veiller à maintenir la décroissance de la forme discrète de l'énergie. La difficulté majeure provient de la non convexité du potentiel de Cahn-Hilliard puisque, de ce fait, le schéma implicite classique ne permet de garantir cette décroissance que pour des pas de temps infimes et uniquement dans le cas d'étalement partiel. Ceci suggère d'en expliciter la partie concave (schéma dénommé convexe-concave ci-après). L'estimation d'énergie est alors valable pour tout pas de temps mais une forte erreur de troncature est introduite. Dans [BM] et [BM11], nous proposons une discrétisation semi-implicite qui permet à la fois d'assurer la décroissance de l'énergie pour tout pas de temps et de limiter l'erreur de troncature.

La figure 5 montre l'influence que peut avoir la discrétisation du terme non-linéaire du système de Cahn-Hilliard sur les résultats obtenus pour la simulation d'une montée de bulle à l'aide du modèle couplé Cahn-Hilliard/Navier-Stokes. L'erreur de troncature commise dans l'approximation du système de Cahn-Hilliard par le schéma convexe-concave se manifeste par une telle sous-estimation de la vitesse de montée de bulle que ce dernier semble inutilisable pour de telles simulations.

Il est également important de noter que l'estimation d'énergie permet de déduire des informations sur les inconnues discrètes suffisantes pour démontrer leur existence, et leur convergence vers la solution du modèle de Cahn-Hilliard. Ces résultats théoriques prouvés dans [BM11] sont présentés de manière



(a) Schéma implicite (b) Schéma semi-implicite (c) Schéma convexe-concave

FIGURE 5 – Comparaison des différents schémas sur une simulation de montée de bulle

synthétique dans le tableau 2. L'absence de résultats théoriques pour le schéma implicite dans le cas d'étalement total se confirme numériquement par une non convergence de la méthode de résolution du problème discret.

Schéma	Implicite	Convexe-concave	Semi-implicite
Etalement partiel	Décroiss. énergie $\Delta t \leqslant \Delta t_0$ Existence $\forall \Delta t$ Convergence	Décroiss. énergie $\forall \Delta t$ Existence $\forall \Delta t$ Convergence	
Etalement total	Problèmes ouverts	Décroiss. énergie $\forall \Delta t$ Existence $\forall \Delta t$ Convergence	

TABLE 2 – Résultats théoriques obtenus pour les différents schémas.

IV Discrétisation en temps du modèle complet Cahn-Hilliard/Navier-Stokes

Les derniers développements théoriques effectués au cours de ma thèse ont conduit à l'écriture d'un schéma numérique inconditionnellement stable pour la résolution du modèle Cahn-Hilliard/Navier-Stokes triphasique complet. Celui-ci autorise une résolution découplée des systèmes discrets de Cahn-Hilliard et Navier-Stokes. A notre connaissance, un tel résultat n'existe pas dans la littérature (y compris dans le cas diphasique). Le schéma comporte un terme de stabilisation d'ordre Δt. Ce schéma permet de conserver au niveau discret les principales propriétés du modèle continu (conservation du volume, somme des paramètres d'ordre égale à 1). En outre, nous démontrons une inégalité d'énergie assurant la décroissance de la somme de l'énergie libre de Cahn-Hilliard et de l'énergie cinétique.

Nous démontrons que le schéma admet des solutions et que, lorsque les trois fluides ont les mêmes densités, les solutions approchées convergent vers une solution faible du modèle Cahn-Hilliard/Navier-Stokes (*cf* [Fen06, KSW08] dans le cas deux phases). Ce résultat permet en particulier de démontrer l'existence d'une telle solution faible pour le modèle Cahn-Hilliard/Navier-Stokes continu dans le cas où les densités des trois fluides sont identiques.

V Méthode de projection incrémentale

La discrétisation en temps des équations de Navier-Stokes est effectuée par un découplage "prédiction-correction" du système de Navier-Stokes : la méthode de projection incrémentale. La première étape est une étape de prédiction de vitesse consistant à résoudre l'équation de bilan de quantité de mouvement en explicitant la pression et laissant temporairement la contrainte d'incompressibilité de côté. Il est important de noter que lors de cette première étape, une formulation particulière du bilan de quantité de mouvement [GQ00] est utilisée. Elle permet d'obtenir le bilan d'énergie cinétique malgré le fait que la densité soit variable et le bilan de masse non vérifié. Dans une seconde étape, la vitesse prédite est exprimée comme la somme d'une vitesse à divergence nulle, la vitesse corrigée, et d'un gradient de pression. La dernière étape consiste alors à ajouter la pression calculée dans l'étape précédente à la pression explicite. Malheureusement du fait de la modification des espaces d'approximation consécutive à l'adaptation de maillage cette dernière étape n'a plus de sens puisque les deux pressions en jeu ne sont pas calculées à partir des mêmes maillages. Il est alors nécessaire d'introduire une sous-étape supplémentaire. Nous avons choisi de l'effectuer en début d'algorithme afin de pouvoir remplacer la pression explicite par une de ses projections permettant de préserver les inégalités d'énergie.

Par ailleurs, lors du couplage de ce schéma aux équations de Cahn-Hilliard, nous avons été confrontés à la problématique des courants parasites (vitesses de faible amplitude localisées au voisinage de l'interface, *cf* [SZ99, JTB02]). Celle-ci s'est avérée liée au fait que la méthode de projection ne permet pas de résoudre exactement le système de Navier-Stokes lorsque le second membre du bilan de quantité de mouvement s'écrit comme le gradient d'une fonction de l'espace d'approximation des pressions. Nous avons proposé une variante de la méthode permettant de corriger ce problème. Celle-ci consiste à tenir compte des variations du second membre dans l'étape supplémentaire évoquée ci-dessus. Ce principe appliqué au modèle Cahn-Hilliard/Navier-Stokes permet de réduire l'importance des courants parasites.

VI Techniques de calcul parallèle

L'objectif des techniques de calcul parallèle est de permettre une exécution du code sur des systèmes à mémoire distribuée. Le domaine de calcul est partitionné en plusieurs sous-domaines, chacun d'entre

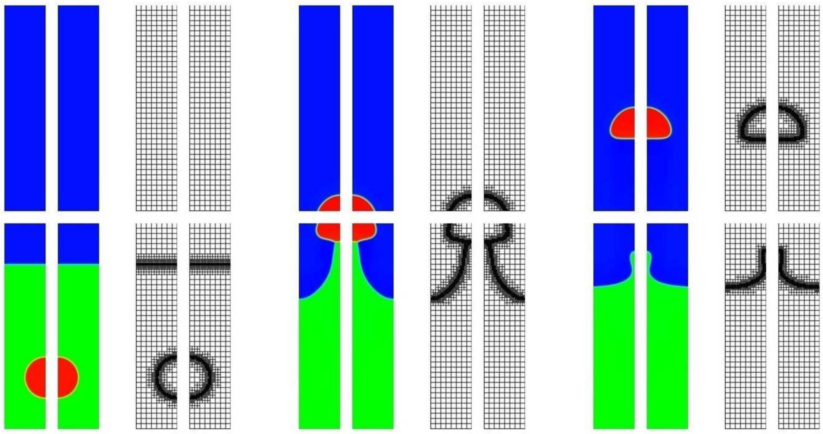


Figure 6 – Exécution d'un calcul sur quatre processus

eux étant affecté à un processus. Chaque processus ne gère alors que les données relatives à la partie qui lui est associée. Les échanges nécessaires à la résolution globale du problème sont organisés grâce à l'utilisation de bibliothèques de communication par passage de message (MPI). La figure 6 montre un exemple de calcul effectué sur quatre processus, chacun sauvegardant la partie du domaine qui lui est affectée.

J'ai contribué aux développements qui ont conduit au fonctionnement des modules de raffinement local et préconditionneurs multigrilles en parallèle dans la plateforme C++ PELICANS (*cf* [PEL]).

Conclusion

Mon travail de thèse a été consacré d'une part à l'étude et l'implémentation des algorithmes de raffinement local et préconditionneurs multigrilles pour des discrétisations éléments finis de Lagrange conforme et d'autre part à l'étude de schémas numériques pour le modèle Cahn-Hilliard/Navier-Stokes triphasique établi dans la thèse de Céline Lapuerta. Ces travaux ont rendu possible des simulations de montées de bulles dans un cadre vraiment tridimensionnel sans supposer de symétrie a priori (Figure 7 et Figure 8).

J'ai également encadré le stage de Master 2 de Fanny Dardhalon au cours duquel une analyse de la méthode de projection dans le cas d'éléments finis non conformes (Crouzeix-Raviart ou Rannacher-Turek) a été réalisée [DLM10]. Ces résultats théoriques ont également été confrontés aux expérimentations numériques.

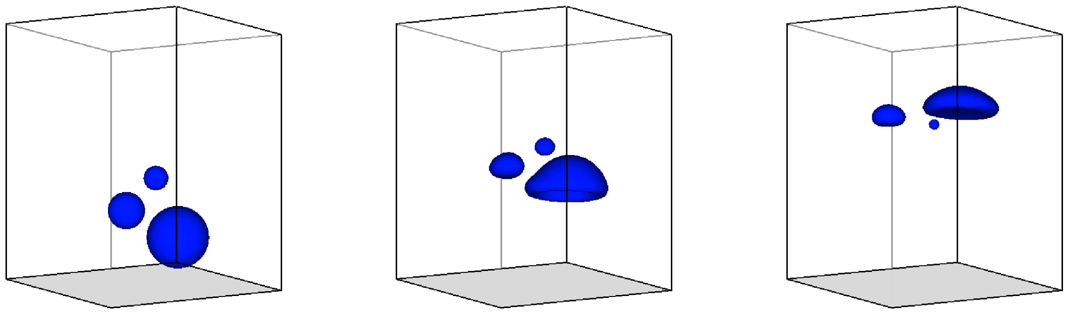


Figure 7 – Calcul 3D disphasique

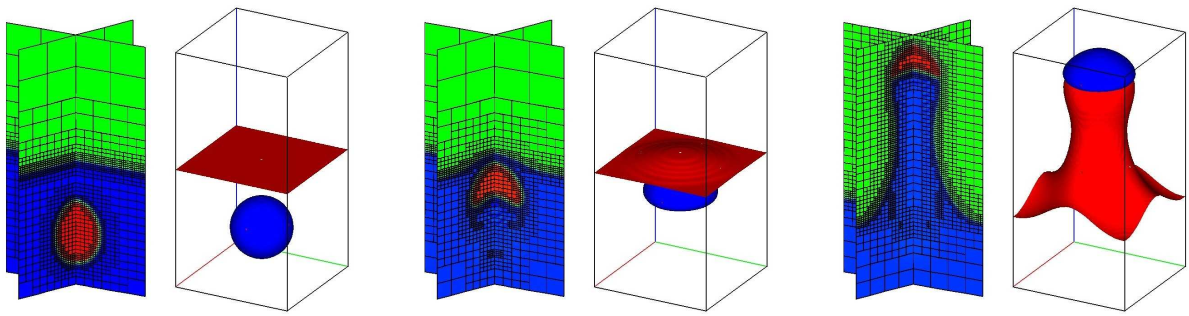


Figure 8 – Calcul 3D triphasique

Références

[BL06] F. Boyer and C. Lapuerta, *Study of a three component Cahn-Hilliard flow model*, M2AN **40** (2006), no. 4, 653–687.

[BLM+10] F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, B. Piar, and M. Quintard, *Cahn-Hilliard/Navier-Stokes model for the simulation of three-phase flows*, Transp. Porous Media **82** (2010), no. 3, 463–483.

[BLMP09] F. Boyer, C. Lapuerta, S. Minjeaud, and B. Piar, *A local adaptive refinement method with multigrid preconditionning illustrated by multiphase flows simulations*, ESAIM Proceedings **27** (2009), 15–53.

[BM] F. Boyer and S. Minjeaud, *Fully discrete approximation of a three component Cahn-Hilliard model*, ALGORITMY, Slovakia, March 2009.

[BM11] ———, *Numerical schemes for a three component Cahn-Hilliard model*, M2AN **45** (2011), no. 4, 697–738.

[BZ00] J. H. Bramble and X. Zhang, *The analysis of multigrid methods*, Handbook of numerical analysis, VOL. VII (P.G. Ciarlet and J.L. Lions), 2000.

[Cra07] M. Cranga, *Status of knowledge and updating of the strategy of r&d on molten corium concrete interaction.*, Tech. report, SEMIC/LETR, 2007.

[DLM10] F. Dardhalon, J.-C. Latche, and S. Minjeaud, *Analysis of a projection method for low order nonconforming finite elements*, en préparation.

[Fen06] X. Feng, *Fully discrete finite element approximations of the Navier-Stokes-Cahn-Hilliard diffuse interface model for two-phase fluid flows*, SIAM J. Numer. Anal. **44** (2006), no. 3, 1049–1072.

[GQ00] J.-L. Guermond and L. Quartapelle, *A projection FEM for variable density incompressible flows*, Journal of Computational Physics **165** (2000), 167–188.

[JTB02] D. Jamet, D. Torres, and J. U. Brackbill, *On the theory and computation of surface tension : The elimination of parasitic currents through energy conservation in the second-gradient method*, Journal of Computational Physics **182** (2002), no. 1, 262 – 276.

[KGS03] P. Krysl, E. Grinspun, and P. Schröder, *Natural hierarchical refinement for finite element methods*, Internat. J. Numer. Methods Engrg. **56** (2003), no. 8, 1109–1124. MR MR1957988

[KSW08] D. Kay, V. Styles, and R. Welford, *Finite element approximation of a Cahn-Hilliard-Navier-Stokes system*, Interfaces Free Bound. **10** (2008), no. 1, 15–43.

[Lap06] C. Lapuerta, *Echanges de masse et de chaleur entre deux phases liquide stratifiées dans un écoulement à bulles*, Mathématiques appliquées, Université de Provence, 2006.

[PEL] PELICANS, Collaborative Development environment : `https://gforge.irsn.fr/gf/project/pelicans/`.

[SZ99] Ruben Scardovelli and Stéphane Zaleski, *Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow*, Annual review of fluid mechanics, Vol. 31, Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 31, Annual Reviews, Palo Alto, CA, 1999, pp. 567–603.

Sebastian Minjeaud

Adresse professionnelle :

Université de Nice-Sophia Antipolis
Laboratoire J.-A. Dieudonné, Bureau 818,
Parc Valrose,
28, avenue Valrose,
06108 Nice Cedex 2

Tél. : 04 92 07 60 31

Pacsé, 28 ans,
Né le 21 mars 1983,
Nationalité française.

minjeaud@unice.fr
http://math.unice.fr/~minjeaud/

Résumé des travaux de post-doctorat :
Modélisation du plasma ionosphérique et propagation d'ondes électromagnétiques.

INRIA Lille - Nord Europe,
ANR Iodissee,
Date de début : octobre 2010,
Superviseurs : Christophe Besse et Pauline Lafitte, Univ. Lille 1.

Introduction : Contexte et motivations

Le positionnement par satellites est aujourd'hui devenu l'un des outils les plus intéressants pour faciliter le déplacement des biens et des personnes. La solution actuelle est basée sur la constellation de satellites Navstar du dispositif américain GPS. L'europe a décidé de lancer un programme concurrent nommé Galileo destiné à supprimer sa dépendance vis-à-vis du système GPS. Le dispositif Galileo devrait être capable de fournir, en temps réel, à l'utilisateur, des informations de positionnement fiables.

Le phénomène de scintillations ionosphériques a été identifié comme étant l'une des principales sources de perturbations de la transmission des données qui pourrait nuire à l'intégrité du service. Il s'agit de fluctuations de l'amplitude et de la phase des ondes transmises causées par les irrégularités de la densité électronique du plasma ionosphérique.

Dans ce contexte, l'objectif de mon post-doctorat est double. Il s'agit, dans un premier temps, d'enrichir les modèles déterministes existants (*cf* [BDD+04]) en ajoutant des termes de forces (gravité ou action d'un champ électrique ambiant) et de les compléter par l'ajout de fluctuations statistiques modélisant la turbulence ionosphérique. Ceci permet d'obtenir des représentations “probables” de la densité électronique dans l'ionosphère. La seconde étape est alors d'utiliser un modèle de propagation d'ondes électromagnétiques dans le milieu obtenu lors de la première étape afin d'évaluer l'influence des différentes irrégularités du plasma ionosphérique sur l'amplitude et la phase des signaux transmis.

I Irrégularités du plasma ionosphérique

Le plasma ionosphérique est le siège de nombreuses instabilités (*cf* [Kel09]) dues principalement à la force de dérive engendrée par le champ magnétique terrestre et les forces s'exerçant sur les particules chargées (gravité, collisions avec les particules neutres, force de Coulomb associée au champ électrique ambiant...). Dans [BDD+04], les auteurs ont construit une hiérarchie de modèles à partir du couplage des équations de Maxwell et d'Euler (le plasma est ici vu comme l'enchevêtrement de trois fluides constitués respectivement des particules neutres, des ions et des électrons). Le modèle le plus simple de cette hiérarchie appelé Striation permet de rendre compte des instabilités précitées (*cf* [BCD+05]) et de simuler les irrégularités de grandes tailles.

Nous superposons à ce résultat des fluctuations de plus petites tailles générées aléatoirement mais de manière à reproduire la corrélation spatiale observée expérimentalement (la corrélation spatiale est définie par l'intermédiaire d'un spectre de turbulence en loi de puissance). Ceci nous permet d'obtenir différentes réalisations “probables” du champ scalaire de densité électronique dans le plasma ionosphérique.

II Propagation d'ondes électromagnétiques

La seconde étape consiste alors à construire un module de propagation d'ondes électromagnétiques dans le milieu fourni par la modélisation présentée dans la première partie. Nous adoptons l'approximation de l'optique géométrique (*cf* [Whe01]). Le problème à résoudre se ramène alors à un système d'équations différentielles ordinaires non linéaires faisant intervenir l'indice de réfraction du milieu qui est donné comme une fonction de la densité électronique du plasma.

Simuler la propagation du signal dans différentes réalisations du milieu permet d'obtenir des informations statistiques sur la modification du signal (en phase et en amplitude) engendrée par les irrégularités du plasma.

Cette deuxième partie du travail et la construction du code de propagation d'ondes est aujourd'hui encore largement en cours.

Références

[BCD+05] C. Besse, J. Claudel, P. Degond, F. Deluzet, G. Gallice, and C. Tessieras, *Instability of the ionospheric plasma : Modeling and analysis*, SIAM Journal on Applied Mathematics **65** (2005), no. 6, 2178–2198.

[BDD+04] C. Besse, P. Degond, F. Deluzet, J. Claudel, G. Gallice, and C. Tessieras, *A model hierarchy for ionospheric plasma modeling*, Math. Models Methods Appl. Sci. **14** (2004), no. 3, 393–415.

[Kel09] M. C. Kelley, *The earth's ionosphere : plasma physics and electrodynamics*, 2nd ed., International Geophysics, vol. 96, Academic Press, 2009.

[Whe01] A. D. Wheelon, *Electromagnetic scintillation*, vol. 1, Cambridge University Press, 2001.