
Projet CAIMAN

Calcul scientifique, modélisation et analyse numérique

Localisation : *Sophia Antipolis*

Mots-clés : modélisation, analyse numérique, élément fini, volume fini, équation intégrale, maillage, méthode particulière, parallélisme, électromagnétisme, problème inverse, ground penetrating radar, combustion, feux de forêts, mécanique des fluides, interaction fluide-structure.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Loula Fezoui, directeur de recherche, INRIA

Responsable permanent

Armel de La Bourdonnaye, IPC

Conseiller scientifique

Frédéric Poupaud, Professeur, UNSA

Collaborateur extérieur

Christian Pichot, DR, LEAT/CNRS

Secrétaire

Pascale Lefebvre, Contractuelle de l'ENPC, jusqu'au 31/08

Brigitte Nicoli, Contractuelle de l'ENPC, à partir du 01/09

Personnel ENPC

Nathalie Glinsky-Olivier, CR Equipement (à temps partiel)

Serge Piperno, IPC

Robert Rivière, ITPE

Chercheur post-doctorant

Jean-Pierre Cioni, Contractuel ENPC jusqu'au 30/06, post-doc industriel INRIA-SIMULOG, à partir du 01/07

Chercheurs doctorants

Mihai Bostan, boursier MESR, à partir du 01/11
 Frédéric Bonnet, boursier MESR
 Sophie Depeyre, boursière ENPC
 Cédric Dourthe, boursier LCPC/ENPC
 Stéphanie Lala, boursière DRET/CNRS
 Malika Remaki, boursière ENPC à partir du 01/10
 François Sévérin, boursier ENPC
 Marc Tolentino, boursier DRET/CNRS

Stagiaires

Thomas Dauvergne, stagiaire INSA Rouen, 4 mois
 Malika Remaki, stagiaire DEA Lyon, 4 mois

2 Présentation du projet

CAIMAN est un projet commun à l'INRIA Sophia Antipolis et au CERMICS, laboratoire de recherche commun avec l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Il a été créé en 1995 à partir de l'équipe sophilopolitaine de « Modélisation et Calcul scientifique » du CERMICS.

Les thèmes scientifiques abordés par CAIMAN s'étendent de la modélisation de phénomènes physiques à leur simulation sur ordinateur. Pour cela, on s'intéresse à la mise au point et à l'analyse de méthodes numériques, ainsi qu'à l'implémentation des algorithmes notamment sur des machines parallèles.

Les domaines d'application sont principalement l'électromagnétisme et la mécanique des fluides.

Nos activités en électromagnétisme concernent les phénomènes de décharges électriques dans le vide, la diffraction d'ondes acoustiques à hautes fréquences, les problèmes inverses en géotechnique, la propagation d'ondes en domaine temporel ainsi que le transport de particules chargées dans un champ électromagnétique.

En mécanique des fluides, on s'intéresse à la mise au point et à l'analyse de méthodes numériques ; les applications sont l'interaction fluide (compressible ou non compressible)-structure, les écoulements à petit nombre de Mach et les feux de forêts.

L'équipe a également participé avec SIMULOG au portage du logiciel MAXWELL/VF sur des architectures parallèles et des réseaux de stations.

3 Actions de recherche

3.1 Electromagnétisme

3.1.1 Electromagnétisme et géométrie différentielle

Participants : Stéphanie Lala, Armel de La Bourdonnaye

Mots-clés : système de Maxwell, Whitney, électromagnétisme.

Nous avons développé une méthode de simulation des équations de Maxwell, qui s'appuie sur la géométrie différentielle, et qui utilise les éléments finis de Whitney. Nous avons implémenté cette méthode en C^{++} pour les cas de dimension 3 ; la discrétisation de l'opérateur de Hodge est faite par la matrice de masse exacte, résolue par une méthode itérative. Cette méthode a été présentée à Eccomas96. Comme elle conserve la charge électrique au plan discret, elle peut être appliquée aux plasmas ; en effet, le fait que la divergence du champ magnétique soit numériquement non nulle peut créer artificiellement un échauffement non physique du plasma.

3.1.2 Phénomènes de décharge et d'ionisation

Participants : François Séverin, Anne Nouri (UNSA), Armel de La Bourdonnaye

Mots-clés : décharge électrique, ionisation, équation de Vlasov-Maxwell.

Nous nous intéressons aux problèmes de décharges électriques dans le vide. Dans un premier temps, nous avons trouvé un modèle qui régit les densités des particules. Les électrons et les ions suivent les équations de dérive-diffusion et les particules neutres les équations d'Euler isothermes. Durant cette année, nous avons étudié l'existence et l'unicité de la solution de ce problème non-linéaire couplé. Nous avons d'autre part étudié un opérateur de collision tenant compte de l'ionisation et de la recombinaison qui comporte un terme cubique.

3.1.3 Approximation haute fréquence des équations intégrales

Participants : Marc Tolentino, Armel de La Bourdonnaye

Mots-clés : équation intégrale, discrétisation microlocale.

On étudie l'utilisation des équations intégrales pour la résolution des problèmes de diffraction d'ondes acoustiques à hautes fréquences. La discrétisation de la formulation variationnelle se fait à l'aide de fonctions de base microlocalisantes. On a utilisé directement l'approximation de Kirchhoff pour réduire le nombre de degrés de liberté et on a obtenu des résultats numériques provenant de la diffraction d'une onde plane par une sphère.

3.1.4 Méthodes numériques pour les problèmes d'auscultation radar du sous-sol

Participants : Cédric Fourthe, Christian Pichot

Mots-clés : ground penetrating radar, problème inverse, imagerie qualitative, imagerie quantitative.

Après l'étape de modélisation du problème direct (calcul du champ diffracté à partir des caractéristiques électromagnétiques des différents milieux) et le développement d'algorithmes d'imagerie adaptés au profil d'antenne utilisé, une étude numérique intensive appliquée à des cas pratiques d'objets enterrés (détection de cavités dans les sols, détection de mines anti-personnel et anti-tanks,...) a été effectuée. Puis des données expérimentales nécessaires à la validation de la méthode furent recueillies sur le terrain, en parallèle avec la modélisation du champ proche émis par l'antenne utilisée pour diverses configurations. Ainsi, des images furent obtenues et comparées à celles issues de données synthétiques. Enfin, est développée actuellement une nouvelle méthode d'imagerie quantitative grâce à laquelle il sera possible de détecter et de localiser l'objet enterré, mais aussi d'identifier celui-ci d'un point de vue électromagnétique.

3.1.5 Equations de Maxwell en domaine temporel

Participants : Laurent Anné (SIMULOG), Frédéric Bonnet, Jean-Pierre Cioni, Loula Fezoui, Didier Issautier, Frédéric Poupaud, Malika Remaki, Hervé Steve (Daussault-Aviation)

Mots-clés : analyse numérique, électromagnétisme, élément fini, système de Maxwell, modélisation, volume fini.

Nous avons développé un solveur du système de Maxwell 3-D en domaine temporel. Ce code, baptisé MAXWELL/VF est basé sur des volumes finis centrés aux nœuds de maillages tétraédriques de type éléments finis conformes. L'approximation spatiale fait appel à des techniques de décentrage, avec un paramètre qui permet de choisir un niveau de précision de 1 à 4 et le décentrage (d'un schéma centré à un schéma complètement décentré). L'intégration en temps est réalisée par des schémas explicites multi-pas de Runge-Kutta.

Ce code a fait l'objet de deux contrats avec la société SIMULOG : un contrat de cession et un autre de post-doctorat industriel pour la valorisation et la validation du code.

Cette action vise aussi à intégrer le code dans une chaîne de logiciels allant du mailleur au post-traitement et à l'implémentation du code sur des architectures parallèles et sur des réseaux de stations. D'autre part, des études se poursuivent pour améliorer l'efficacité du code et pour introduire des extensions telles que la prise en compte de courants de surface et le traitement de matériaux revêtus (calcul en milieu hétérogène). Cette dernière extension nous a amenés à étudier une autre définition des volumes de contrôle en les identifiant maintenant aux cellules du maillage : triangles en 2-D et tétraèdres en 3-D.

Les travaux ont commencé dans un cadre bidimensionnel en vue de comparer la qualité, la robustesse et l'efficacité des codes issus des deux formulations. Toujours dans le but d'augmenter l'efficacité des simulations en domaine temporel, nous étudions les formulations en maillages hybrides (conformes dans un premier temps). Les résultats obtenus pour des calculs de SER en deux dimensions d'espace sont assez encourageants pour envisager une collaboration avec des équipes spécialisées dans la construction de maillages voire de mailleurs pour étendre ces travaux au cas tridimensionnel.

3.1.6 Conditions aux limites

Participants : Frédéric Bonnet, Loula Fezoui, Armel de La Bourdonnaye, Frédéric Poupaud

Mots-clés : analyse numérique, condition aux limites, électromagnétisme, système de Maxwell, modélisation, volume fini.

Dans la configuration actuelle, les simulations numériques en régime fréquentiel (telles que les calculs de SER) par le solveur MAXWELL/VF nécessitent une distance de l'ordre de deux longueurs d'onde entre l'obstacle et la frontière artificielle du domaine de calcul. Cette condition peut s'avérer très restrictive pour des calculs tridimensionnels complexes, en termes de coût CPU.

Après une étude bibliographique sur l'état de l'art dans le domaine des conditions aux limites absorbantes, nous avons décidé d'adapter la méthode dite PML (Perfectly Matching Layer) introduite par Bérenger au cas des schémas volumes finis en maillages non structurés. Des travaux préliminaires en deux dimensions d'espace ont montré que l'on peut ramener la distance à la frontière artificielle de deux à une longueur d'onde, tout en préservant la qualité des solutions obtenues. Cependant les équations supplémentaires introduites par Bérenger rendent le système de Maxwell ainsi modifié non hyperbolique dans les variables B et D (induction magnétique et déplacement électrique). Une étude théorique sur l'hyperbolicité des équations de Bérenger a été réalisée. L'extension au cas tridimensionnel est en cours.

3.1.7 Transport de charges

Participants : Jean-Pierre Cioni, Mihai Bostan, Loula Fezoui, Didier Issautier, Frédéric Poupaud, Robert Rivière

Mots-clés : analyse numérique, électromagnétisme, élément fini, système de Vlasov-Maxwell, méthode particulaire, modélisation, volume fini.

Nous avons développé des solveurs du système de Vlasov-Maxwell en deux et trois dimensions d'espace. Ces équations modélisent le transport de particules chargées en interaction avec un champ électromagnétique. La résolution du couplage est réalisée via une méthode de volumes finis (solveur MAXWELL/VF) pour l'obtention du champ électromagnétique et à l'aide d'une méthode particulaire déterministe pour l'obtention des charges et des courants. Les simulations numériques effectuées ont révélé les limites en termes d'efficacité d'un tel couplage. Une thèse débute sur ce sujet ; son but est d'étudier la convergence de la méthode vers des états périodiques et de construire des schémas d'approximation spatiale et temporelle plus efficaces et précis que ceux utilisés jusqu'ici.

3.1.8 Méthode de pénalisation pour le système de Maxwell

Participants : Sophie Depeyre, Didier Issautier, Loula Fezoui

Mots-clés : pénalisation des contraintes, système de Maxwell, élément fini, volume fini, équation équivalente, étude de stabilité.

Nous étudions une nouvelle formulation du système de Maxwell qui introduit un terme de viscosité dans les équations, afin de mieux vérifier numériquement les relations de divergence $\operatorname{div}\mathbf{B} = 0$, $\operatorname{div}\mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$. Nous utilisons des schémas d'ordre élevé de type volumes finis/éléments finis. Nous montrons, en établissant les équations équivalentes, pourquoi ces relations sont mieux vérifiées en considérant cette nouvelle formulation. Nous avons également étudié la stabilité des schémas présentés.

3.2 Mécanique des fluides

3.2.1 Schémas décentrés TVD d'ordre élevé

Participants : Serge Piperno, Sophie Depeyre, Loula Fezoui

Mots-clés : analyse numérique, volume fini, schéma TVD, interpolation MUSCL, limiteur.

Nous nous sommes intéressés à la construction de schémas conservatifs décentrés d'ordre élevé qui soient TVD (Total Variation Diminishing). L'approche MUSCL avec $\beta = 1/3$ permet en volumes finis d'atteindre une précision d'ordre trois. Mais malheureusement, même pour l'advection linéaire, le schéma obtenu produit des oscillations parasites près des discontinuités. Nous avons construit des limiteurs nouveaux, adaptés à l'extension MUSCL pour $\beta = 1/3$, qui sont plus performants que les limiteurs existants. Ces nouveaux limiteurs ont été testés en une dimension sur l'équation de Burgers et en deux dimensions sur les équations d'Euler en maillage non-structuré.

3.2.2 Systèmes hyperboliques avec terme source raide. Application aux écoulements diphasiques dispersés.

Participants : Sophie Depeyre, Lionel Sainsaulieu (Renault)

Mots-clés : écoulement diphasique dispersé, volume fini, méthode à pas fractionnaires, méthode couplée.

Nous considérons un modèle hyperbolique conservatif où les deux phases gaz-gouttes sont reliées par un terme source qui peut être raide. La méthode classique pour ce genre de problème est d'utiliser une méthode à pas fractionnaires. Cependant, cette méthode comporte plusieurs faiblesses dans le cas d'écoulements stationnaires et instationnaires. Nous proposons ici une « méthode couplée » qui ne sépare pas la partie convective et le traitement du terme source. Nous utilisons plusieurs schémas précis en temps et espace, explicites comme implicites. Nous comparons les deux méthodes en considérant la propagation d'une onde sonore dans un mélange diphasique. Nous nous intéressons ensuite à la simulation d'écoulements diphasiques dans une tuyère et nous comparons les solutions stationnaires obtenues avec les deux méthodes.

3.2.3 Comparaison de méthodes déterministes et probabilistes pour la résolution de l'équation de Burgers

Participants : Mireille Bossy (OMEGA), Serge Piperno, Loula Fezoui

Mots-clés : équation de Burgers, méthode probabiliste, volume fini.

Pour l'équation de Burgers visqueuse, nous avons comparé deux méthodes numériques efficaces, l'une de type probabiliste, et l'autre plus classique qualifiée de déterministe par opposition. Le modèle probabiliste utilise un nuage de particules représentant le gradient de la solution et dont la loi d'évolution est reliée à l'équation de Burgers visqueuse. La méthode déterministe utilise un solveur de Riemann

exact (Godunov) en volumes finis et une extension de type MUSCL avec limiteurs, précise à l'ordre trois en espace et TVD. Le critère de comparaison choisi est l'erreur L^1 entre la solution exacte et la solution approchée donnée par chaque méthode, pour le même temps de calcul.

3.2.4 Interaction fluide compressible/structure

Participants : Serge Piperno, Stéphane Lanteri (SINUS), Charbel Farhat (université du Colorado, Boulder (US))

Mots-clés : conception d'algorithme décalé, interaction fluide-structure, fluide compressible, maillage dynamique, volume fini.

L'étude de phénomènes d'interaction entre un fluide compressible et une structure linéaire dans un cadre tri-dimensionnel a été abordée. L'objet de nos travaux, en étroite collaboration avec le projet SINUS, était la validation d'une version parallèle du code couplé tridimensionnel élaboré à Boulder (US). Pour cela, on a cherché à simuler le flottement supersonique d'un panneau flexible bidimensionnel. Il s'agissait de retrouver les résultats théoriques obtenus à partir d'un modèle simplifié monodimensionnel de poutre. En collaboration avec C. Farhat, nous avons commencé à étudier l'évaluation quantitative de schémas de couplage de type décalé. Il s'agit de quantifier, pour un algorithme donné, l'énergie artificiellement créée à l'interface fluide/structure à chaque pas de temps. Cette évaluation permettrait de classer les algorithmes et de choisir l'algorithme adéquat pour un type de simulation donné.

3.2.5 Interaction fluide incompressible/structure

Participants : Serge Piperno, Thomas Dauvergne, Frédéric Hecht (M3N)

Mots-clés : interaction fluide-structure, fluide incompressible, maillage dynamique, élément fini.

Nous avons abordé cette année la simulation numérique d'interactions entre un fluide incompressible et une structure. Nous avons modifié le code NSI3 (M3N) permettant la simulation instationnaire d'un fluide incompressible visqueux en éléments finis. Une formulation en maillage dynamique a été introduite (maillage mobile, modification de la méthode des caractéristiques). De plus, les mouvements du maillage et de la structure ont été importés du code aéroélastique compressible mis au point ces dernières années. Le code obtenu a été validé sur deux problèmes modèles. Le premier concerne une cavité « entraînée » dont la face inférieure est une plaque linéairement déformable. Le second est un écoulement autour d'une sphère en mouvement rigide. Dans chaque cas, la structure s'immobilise après un régime transitoire dans une position déformée.

3.2.6 Ecoulements à petit nombre de Mach

Participante : Nathalie Glinsky-Olivier

Mots-clés : équation d'Euler, mécanique des fluides, méthode numérique, schéma décentré, décomposition de flux.

L'étude de schémas numériques adaptés à la résolution des équations d'Euler dans le cas d'écoulements à petit nombre de Mach a été poursuivie. Les équations sont résolues par une méthode à pas fractionnaires où les termes en vitesse et pression apparaissant dans les flux des équations d'Euler sont traités séparément. On applique un simple schéma décentré pour le pas fluide, et un schéma de Roe pour le pas en pression.

On a comparé les résultats obtenus par cette méthode à ceux obtenus précédemment avec la décomposition basée sur les valeurs propres. Pour cela, on a comparé plusieurs méthodes de résolution : un schéma explicite où l'on applique aux deux pas un schéma prédicteur-correcteur, un schéma implicite (pour les deux pas) et enfin un schéma semi-implicite où seule l'étape en pression est implicite. La

précision d'ordre deux en espace est obtenue via la méthode MUSCL. Les résultats obtenus sont comparables à ceux de la décomposition caractéristique et montrent un net gain en précision et en efficacité obtenu avec le schéma semi-implicite.

3.2.7 Feux de forêts

Participante : Nathalie Glinsky-Olivier

Mots-clés : combustion, modélisation.

Le travail dans le domaine des feux de forêts reprend à l'occasion d'un nouveau contrat européen (début 01/09). L'objectif de ce nouveau contrat, un peu différent des travaux précédents, est l'étude du comportement du feu dans la strate inférieure de la végétation (on ne traite pas ici les strates arbustives élevées et les strates arborées) c'est à dire à une échelle où l'on peut étudier la flamme. Le rôle du projet dans ce contrat est de travailler, en étroite collaboration avec l'IUSTI (u. Aix-Marseille), à l'extension d'un modèle monophasique existant (modèle bidimensionnel où le combustible est plan, homogène et non organique; modèle basé sur les équations de Navier-Stokes en phase gazeuse tenant compte des réactions chimiques et de la radiation) au cas multiphasique où le milieu est hétérogène et poreux. Dans un premier temps, on effectue une étude bibliographique précise des effets du vent ambiant et du vent induit par le feu, ainsi que du rôle de la colonne de convection et de l'alimentation de la flamme en air frais afin d'inclure les meilleurs approches dans le modèle.

3.3 Calcul parallèle

Participants : Laurent Anné (SIMULOG), Jean-Pierre Cioni, Mark Loriot (SIMULOG)

Mots-clés : parallélisme, PVM.

Les travaux ont porté cette année sur le portage du code MAXWELL/VF sur des architectures parallèles (machine CAPITAN) et des réseaux de stations. La parallélisation utilise essentiellement l'outil de décomposition de maillages MS3D de SIMULOG et la librairie de communication PVM.

4 Action industrielles

4.1 Industrialisation du code MAXWELL/VF

Participants : Jean-Pierre Cioni, Loula Fezoui

Post-doctorat industriel INRIA-SIMULOG de Jean-Pierre Cioni afin de développer le logiciel MAXWELL/VF.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

Participation au groupe de travail INRIA « Interaction fluide/structure », regroupant les projets Caiman, M3N et Sinus, dont l'objectif est l'élaboration à l'INRIA d'un logiciel prototype de résolution des problèmes d'interaction fluide/structure.

5.2 Actions internationales

5.2.1 Europe de l'ouest

Projet de Recherche Communautaire:

- ENV4-CT96-0299
- Titre : EFAISTOS: Expérimentations et simulations pour l'amélioration de modèles de comportement des feux de forêts
- Programme : Environnement et climat
- Date et durée : 1er septembre 1996, 24 mois
- Mode de participation : sous-contractant d'ARMINES
- Coordonnateur : J.-C. Valette, INRA PIF, Avignon
- Partenaires : ARMINES (F), TNO (NL), DIFT (DK), IST (PT), IUSTI (F), NARF (GR), CAIMAN (ENPC,F), INIA (ES), ADFA (AU), UNSA (F)
- Résumé: Ce projet participe au développement d'un modèle européen de comportement du feu de forêt prenant essentiellement en compte la strate inférieure. Les deux objectifs majeurs du projet sont la conception et la mise en œuvre d'un modèle physique amélioré ainsi que la conception et l'implantation d'un Environnement de Résolution de Problèmes (ERP) regroupant tous les outils nécessaires à la modélisation. Les expériences de laboratoires se limiteront au comportement du feu dans la litière forestière et les feux expérimentaux sur le terrain aux basses strates.

5.2.2 Amérique

Collaboration avec C. Farhat de l'université du Colorado à Boulder (US) sur l'interaction fluide/structure et sur l'acoustique sous-marine haute fréquence.

5.2.3 Asie et Océan Pacifique

Collaboration avec R.O. Weber, W. Catchpole et E.A. Catchpole du Department of Mathematics and Statistics, Australian Defense Force Academy à Canberra (AU) dans le cadre du contrat sur la modélisation des incendies de forêts.

6 Diffusion des résultats

6.1 Habilitation à diriger les recherches

A. de La Bourdonnaye, université Pierre et Marie Curie, septembre 1996.

6.2 Thèses

- Thèses en cours :
 1. M. Bostan, Schémas numériques pour la résolution du système de Vlasov-Maxwell, ENPC
 2. F. Bonnet, Méthodes de résolution efficaces pour le système de Maxwell instationnaire, UNSA

3. S. Depeyre, Méthodes numériques décentrées pour la mécanique des fluides et l'électromagnétisme, ENPC
 4. C. Dourthe, Auscultation radar : application à la reconnaissance géotechnique, ENPC (thèse de géotechnique)
 5. S. Lala, Approximation géométrique des équations de l'électrodynamique, ENPC
 6. M. Remaki, Méthodes numériques pour les équations de Maxwell instationnaires en milieu hétérogène, ENPC
 7. F. Sévérin, Etude de la modélisation de décharges sous vide et simulation, ENPC
 8. M. Tolentino, Approximation à hautes fréquences des équations intégrales, ENPC
- Thèses soutenues dans le projet
1. J.-P. Cioni, Une méthode de volumes finis pour le résolution des équations de Maxwell instationnaires, université de Nice-Sophia Antipolis, décembre 1995.
 2. D. Issautier, Méthodes particulières en cinétique des gaz et transport de charges, université de Nice-Sophia Antipolis, décembre 1995.

6.3 Stages

- T. Dauvergne, Simulation numérique de phénomènes d'interaction entre un fluide incompressible et une structure linéaire élastique, INSA-Rouen, 4 mois.
- M. Remaki, Comparaison de deux méthodes de volumes finis en électromagnétisme, stage de DEA de l'université Claude Bernard, Lyon, 4 mois.

6.4 Participation à des colloques

- Communication de Frédéric Bonnet au congrès national d'analyse numérique SMAI'96.
- Communication de Serge Piperno au congrès ECCOMAS'96.
- Communication de Stéphanie Lala et Armel de La Bourdonnaye au congrès ECCOMAS'96.
- Communication de Cédric Dourthe au «2nd Meeting Environmental and Engineering Geophysics» à Nantes.
- Communication de Cédric Dourthe au EUREL International Conference à Edimbourg (GB).

6.5 Cours

- Participation d'Armel de La Bourdonnaye comme orateur à la première école d'été sur les méthodes de sous-domaine du CEMRACS à Orsay.
- *Mécanique des fluides : initiation à la simulation numérique*, N. Glinsky-Olivier, S. Piperno, R. Rivière, Semaine européenne, ENPC, 18-22 novembre.

6.6 Animations scientifiques

Présentation des résultats concernant l'activité sur les feux de forêts lors de la *Science en fête* organisée par le ministère de la recherche à l'Acropolis, Nice.

6.7 Diffusion de logiciels

Le logiciel MAXWELL/VF version 1.0 a été développé en collaboration avec SIMULOG.

7 Publications

Thèses

- [377] J.-P. CIONI, *Une méthode de volumes finis pour la résolution des équations de Maxwell instationnaires*, mathématiques appliquées, université de Nice-Sophia Antipolis, décembre 1995.
- [378] D. ISSAUTIER, *Méthodes particulières en cinétique des gaz et transport de charges*, mathématiques appliquées, université de Nice-Sophia Antipolis, décembre 1995.

Articles et chapitres de livre

- [379] A. DE LA BOURDONNAYE, «Sur le problème de Cauchy pour le système de Bérenger», *Note aux C.R.A.S. t. 322, Série I*, 1996, p. 285–288.
- [380] N. GLINSKY-OLIVIER, B. LARROUTUROU, «Sur la modélisation des incendies de forêt», *Annales des Ponts et Chaussées 74*, 1995, p. 4–14.
- [381] S. PIPERNO, B. LARROUTUROU, M. LESOINNE, «Analysis and compensation of numerical damping in a one-dimensional aeroelastic problem», *International Journal for Computational Fluid Dynamics 6*, 1996, p. 157–174.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [382] A. DE LA BOURDONNAYE, S. LALA, «Duality between finite elements and finite volumes and Hodge operator», in: *Proceedings of the Second ECCOMAS Conference on Numerical Methods in Engineering*, J.-A. Désidéri, P. Le Tallec, E. Oñate, J. Périaux, E. Stein (éd.), John Wiley & Sons, p. 557–561, Paris, France, 9-13 septembre 1996.
- [383] C. DOURTHE, C. PICHOT, X. DEROBERT, P. COTE, «Microwave tomography imaging for geophysical applications», in: *GPR'96, 6th International conference on ground penetrating radar*, p. 253–256, Sendai, Japan, 1996.
- [384] C. DOURTHE, C. PICHOT, «Microwave imaging algorithms for arbitrary space and time incident waveforms using ultrawide bandwidth GPR technique», in: *The detection of abandoned land mines, EUREL International Conference*, p. 124–127, Edinburgh, Scotland, 1996.
- [385] S. LANTÉRI, B. N'KONGA, S. PIPERNO, «Domain Partitioning and Message Passing for the Distribution of Unstructured Mesh Calculations on MIMD Platforms: Application to Steady and Unsteady Compressible Flow Simulations», in: *Proceedings of the Parallel Computational Fluid Dynamics 96 Conference (à paraître)*, P. Schiano, A. Ecer, J. Périaux, N. Satofuka (éd.), Elsevier Science Publishers B.V., North Holland, Capri, Italy, 20-23 mai 1996.
- [386] C. PICHOT, C. DOURTHE, «Microwave imaging method for tomographic reconstructions of buried inhomogeneities», in: *2nd Meeting Environmental and Engineering Geophysics, EEGS International Conference, European Section*, p. 268–271, Nantes, France, 1996.
- [387] S. PIPERNO, «Two-dimensional Euler aeroelastic simulations with interface matching relaxation», in: *Proceedings of the Second ECCOMAS Conference on Numerical Methods in Engineering*, J.-A. Désidéri, P. Le Tallec, E. Oñate, J. Périaux, E. Stein (éd.), John Wiley & Sons, p. 898–904, Paris, France, 9-13 septembre 1996.

Rapports de recherche et publications internes

- [388] F. BONNET, F. POUPAUD, «Condition aux limites de Bérenger avec un schéma temporel de type volumes finis en maillage triangulaire», *rapport de recherche n°96-53*, CERMICS, 1996.
- [389] F. BONNET, «Rapport bibliographique sur les conditions aux limites absorbantes pour la propagation d'ondes», *rapport de recherche n°96-52*, CERMICS, 1996.
- [390] T. DAUVERGNE, *Simulation numérique de phénomènes d'interaction entre un fluide incompressible et une structure linéaire élastique*, Mémoire, INSA-Rouen, 1996.
- [391] S. DEPEYRE, «Une méthode couplée pour la simulation d'écoulements diphasiques dispersés», *rapport de recherche n°96-78*, CERMICS, 1996.
- [392] C. DOURTHE, C. PICHOT, «Application de l'imagerie microonde a la tomographie radar du sous-sol», *rapport de recherche n°96-66*, CERMICS, 1996.
- [393] J.-F. GERBEAU, N. GLINSKY-OLIVIER, B. LARROUTUROU, «Semi-implicit Roe-type fluxes for low Mach number flows», *rapport de recherche n°96-79*, CERMICS, 1996.
- [394] A. NOURI, A. DE LA BOURDONNAYE, «Ionisation and recombination in plasmas», *rapport de recherche n°96-71*, CERMICS, 1996.
- [395] S. PIPERNO, «Schémas TVD d'ordre élevé pour la résolution de l'équation de Burgers», *rapport de recherche n°96-49*, CERMICS, janvier 1996.
- [396] M. REMAKI, *Comparaison de deux méthodes volumes finis en électromagnétisme*, Mémoire, DEA, Univ. C. Bernard, Lyon, 1996.

8 Abstract

CAIMAN is a project common to INRIA and CERMICS. Its researches cover a wide field ranging from the modelling of various physical phenomena to scientific computing, including analysis of numerical methods and implementation on parallel computers.

Applications are mainly on electromagnetism and fluid mechanics. For electromagnetism, we are concerned with electric discharge in vacuum, high frequency scattering, inverse problems for geotechnics, propagation of charged particles in a self-consistent field. For fluid mechanics, we are concerned with the analysis and implementation of numerical methods for (compressible and incompressible) fluid/structure interaction, for low Mach number flows and forest fire propagation.

We collaborate with SIMULOG for the implementation of the software MAXWELL/VF on parallel computers.

